

数字通信理论基础

王光兴 王越先 主编



NEUPRESS
东北大学出版社

156

TM14-3
V32(2)

数字通信理论基础

王光兴 王越先 主编

东北大学出版社

内 容 简 介

本书比较全面地论述了数字通信的基本概念、基本原理和方法。其中包括数字通信基础知识、确知信号和随机信号分析基础,基带传输和频带传输,最佳接收机原理及最佳接收机的设计、信道及其特性、信源与信道编码及编码系统的实现。

本书可供通信工程专业、电子与信息技术专业本科生及研究生作为教材使用,部分内容也可作为通信概论给非通信专业的本科生讲授。还可作为通信工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字通信理论基础/王光兴,王越先主编. —沈阳:东北大学出版社,2001.11

ISBN 7-81054-669-4

I. 数… II. ①王… ②王 III. 数字通信-通信理论 IV. TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 079735 号

©东北大学出版社出版

(沈阳市和平区文化路3号巷11号 邮政编码 110004)

电话:(024)23890881(社务室) (024)23892538(传 真)

83687331(发行部) 83687332(出版部)

网址:<http://www.neupress.com> E-mail:neuph@neupress.com

沈阳农业大学印刷厂印刷

东北大学出版社发行

开本:787mm×1092mm 1/16

字数:711千字

印张:28.5

印数:1~3000册

2001年11月第2版

2001年11月第1次印刷

责任编辑:李毓兴

责任校对:米 戎

封面设计:唐敏智

责任出版:杨华宁

定价:39.80元

第二版前言

随着信息社会的到来,信息技术正在使信息继物资、能源之后成为国民经济财富积累和流向的主要经济资源。而信息社会的基础是计算机和互连计算机的信息网络以及通信技术和计算机与信息处理技术的发展。现在可以说,整个世界或人类能到达的宇宙空间都被一些巨大的通信链条所覆盖着,它使人们在相互无论多么远的地方都几乎能毫无延迟的传递、存储、处理和利用信息。

本书根据数字通信系统所涉及的技术范围,并根据信息传输的顺序、信息处理的方法,系统地讲述数字通信的基础理论和数字通信中的编码原理。本书在第一版的基础上做了一些调整,更新了部分内容,使之能满足教学要求,与当今数字通信技术的发展同步。全书安排下列内容:第一章、绪论。以信息论为基础讲述古典及现代通信理论以及通信系统组成的基本单元,通信问题的概率模型、性能与通信方式。第二章、正交性及信号的表示。从信号的正交性出发,讨论信号的时域及频率特性和系统特性,以及信号通过系统后的特性。同时系统地介绍一种完备正交函数系——沃尔什函数的基本定义和利用沃尔什函数展开信号的方法。第三章、随机信号分析基础。以统计通信理论为基础讲述随机信号及随机过程在通信中的意义。第四章、模拟信号的数字传输。通信系统包括模拟通信和数字通信,本章讲述PCM原理及 ΔM 增量调制技术将模拟通信转换为数字通信原理,同时提出信源编码的方法。第五章、基带传输系统。信息的传输分基带和频带两种方法。本章在分析基带信号及其功率谱密度的基础上,研究信号的基带传输方法。第六章、数字信号最佳接收。在分析最佳接收原理的基础上,提出最佳接收机的设计,并将波形通信转换成矢量通信,为实现高质量的数字通信建立了理论基础。第七章、消息序列的有效信号形成。在分析序列信源,信号与分组正交信号基础上,从信息传输的观点出发,论证了世界著名的科学家仙农所提出的信道容量与受限的信道带宽、信号功率与噪声功率之间的关系。第八章、传输信道。本章讨论了信道的分类、信道标准、信道模型以及信道对数字信号传输的影响。第九章、数字调制技术。在讲述传统的ASK FSK PSK调制技术基础上,介绍一种双二进制编码系统与AM/PSK调制技术。它比正在广泛使用的其他调制技术有更高的传输速率。第十章、同步原理。第十一章、信道编码原理。第十二章、编码系统的实现。第十一章和第十二章在介绍信道编码原理之后,提出了实现最佳编码的方法。全书所讨论的问题着重基本概念、基本原理和基本方法的阐述。

本书由东北大学王光兴教授、王越先教授、李喆教授、杜荔副教授执笔。第一章、第二章、第三章由王越先编写,其中第三章3.3,3.4,3.5由李喆编写。第四章由李喆编写,第五章由王越先编写。第六章、第七章由王光兴编写。第八章由杜荔编写。第九章由王越先编写,其中9.6,9.7,9.8,9.9由李喆编写。第十章、第十一章由李喆编写。第十二章由王光兴编写。

对应于本书的内容,作者建议已经熟悉通信原理内容的研究生可以跳过第一章、第二章、第三章、第四章、第五章、第九章、第十章、第十一章,只阅读第六章、第七章、第八章、第十

二章即可。如果读者是非通信专业的,可先学习第一章、第二章、第三章、第四章、第五章、第九章的内容,然后再学习以后的内容,如果是通信工程专业的本科生,建议学习第一章~第五章,第九章~第十一章。

本书作者结合上述内容,给本科生和研究生作过多次讲授,收到良好的效果。

全书由王光兴教授通审,由王越先教授统稿。

本书作者虽然将本教材用于本科与研究生教学十余年,但由于水平有限难免出现错误,敬请广大读者批评指正。

2001年10月

于东北大学

目 录

第一章 绪 论	1
1.1 概 述	1
1.1.1 通信理论的发展过程	2
1.1.2 通信的随机性	5
1.1.3 通信问题的概率模型	5
1.2 通信系统的基本单元	9
1.2.1 信息源	10
1.2.2 信 道	10
1.2.3 信源编码和信源译码	10
1.2.4 信道编码和信道译码	11
1.2.5 调制器与解调器	11
1.3 通信方式	12
1.3.1 单工通信方式	12
1.3.2 半双工通信方式	12
1.3.3 全双工通信方式	12
习 题	14
第二章 正交性及信号的表示	16
2.1 信号和系统	16
2.1.1 信号的分类	17
2.1.2 系统的分类	22
2.2 信号用正交函数系表示	23
2.3 正交函数系的选择	25
2.3.1 信号的指数函数的傅氏展开	25
2.3.2 信号的三角傅氏级数的展开	26
2.3.3 周期性信号的展开	28
2.3.4 非周期性信号的展开	29
2.4 某些常用信号的傅里叶变换	31
2.4.1 周期性函数	31
2.4.2 非周期信号	34
2.4.3 冲激函数的傅里叶变换	36
2.4.4 常数的傅里叶变换	36
2.4.5 单边指数信号 $e^{-\alpha u}(t)$ 傅里叶变换	37

2.4.6	双边指数信号 $e^{-a t }$ 傅里叶变换	37
2.4.7	$\text{sgn}(t)$ 的傅里叶变换	38
2.4.8	单位阶跃函数 $u(t)$ 的傅里叶变换	38
2.4.9	无穷期指数信号 $e^{j\omega_0 t}$ 的傅里叶变换	39
2.4.10	无穷期正弦信号的傅里叶变换	39
2.5	傅里叶变换的一些性质	40
2.5.1	线性特性	41
2.5.2	比例特性	41
2.5.3	时移性	42
2.5.4	移频特性	43
2.5.5	对称特性	43
2.5.6	微分特性	45
2.5.7	积分特性	46
2.6	能量谱密度和功率谱密度	47
2.7	沃尔什函数和利用沃尔什函数展开任意信号函数	50
2.7.1	沃尔什函数的定义	51
2.7.2	沃尔什函数的性质	58
2.7.3	利用沃尔什函数展开任意信号 $x(t)$	61
2.8	卷积积分	63
2.8.1	卷积的基本形式	63
2.8.2	卷积的运算规律	63
2.8.3	卷积定理	64
2.8.4	卷积的图解说明	65
2.8.5	$\delta(t)$ 与任意信号 $f(t)$ 的卷积	67
2.9	带限—时限信号的展开	67
2.10	系统对信号的响应	73
2.11	线性系统的无失真传输	74
	习 题	77
第三章	随机信号分析基础	84
3.1	概 述	84
3.1.1	几个术语	84
3.1.2	条件概率的意义	85
3.1.3	条件概率在通信中的应用	87
3.2	随机过程的基本概念及在通信中应用	93
3.2.1	随机过程的统计表示	94
3.2.2	平稳随机过程的自相关函数	96
3.2.3	平稳随机过程的各态历经假设	99
3.2.4	自相关函数 $R(\tau)$ 的性质	99
3.2.5	独立随机过程之和的自相关函数	100

3.2.6	功率频谱密度和维纳—欣钦定理	102
3.2.7	$s(0)$ 与 $R(\tau)$ 的关系, $R(0)$ 与 $S(\omega)$ 的关系以及平稳随机过程的自相关时间和谱带宽度	106
3.2.8	平稳随机过程通过线性网络	109
3.3	高斯过程	112
3.4	窄带随机过程	113
3.5	正弦波加窄带高斯过程	116
3.6	不自相关的随机过程—白色过程	120
	习 题	122
第四章	模拟信号的数字传输	127
4.1	引 言	127
4.2	PCM 的基本原理	127
4.3	PCM 的系统性能	142
4.4	增量调制(ΔM)	145
4.5	增量调制(ΔM)系统性能	149
4.6	PCM 与 ΔM 系统的性能比较	154
4.7	改进型增量调制	155
4.8	增量(差分)脉冲编码调制(DPCM)	159
4.9	时分复用(TDM)	159
4.10	信源编码	160
	习 题	161
第五章	基带传输系统	163
5.1	基带传输系统	163
5.2	基带信号及其功率密度谱	164
5.2.1	单极性非归零脉冲信号	164
5.2.2	基带信号的功率密度谱	165
5.2.3	各种形式的基带信号及其功率谱密度函数	172
5.3	理想基带系统	177
5.3.1	理想基带系统及基带信号传输系统的典型模型	177
5.3.2	基带系统传输中码间干扰的基本概念	179
5.3.3	基带整形和奈奎斯特准则	180
5.3.4	理想信道中的发送和接收滤波器	185
5.4	部分响应基带传输系统	186
5.4.1	部分响应波形	186
5.4.2	部分响应基带传输系统的预编码	188
5.5	数字信号基带传输的差错率	189
5.6	眼 图	192
5.7	基带传输系统的均衡	194

习 题	198
第六章 数字信号最佳接收	201
6.1 引 言	201
6.2 波形信号集合的矢量表示	203
6.2.1 波形信号的矢量表示	206
6.2.2 标量积	208
6.2.3 信号能量的矢量表示	208
6.2.4 信号相关函数的矢量表示	209
6.2.5 波形信号的合成	210
6.2.6 格兰姆—施密特(Gram—Schmidt)正交化过程	210
6.3 平稳白高斯噪声的矢量表示	218
6.4 最佳接收机设计的基本方法	221
6.4.1 沿可加性零均值白色高斯噪声通道进行通信的分析	221
6.4.2 矢量通道的特性	223
6.4.3 矢量通道的最佳接收机	224
6.5 在可加性白色高斯噪声通道中最佳接收机的错判概率	229
6.5.1 判决域的“旋转”和“搬移”	229
6.5.2 受到能量约束的信号集合	232
6.5.3 矩形配置的信号集合错判概率的计算	232
习 题	235
第七章 消息序列的有效信号形成	238
7.1 序 言	238
7.2 序列信源	238
7.2.1 信源速率	238
7.2.2 发射机功率	240
7.3 比特形式的信号与分组正交信号	240
7.3.1 比特形式的信号形成方法	241
7.3.2 分组正交信号构成	242
7.4 时间,带宽和信号维数	244
7.4.1 作为 T 的函数的信号维数	244
7.4.2 具有分组正交信号构成的带宽要求	246
7.5 有效信号选择	247
7.5.1 二进制波形序列的信号构成方法	247
7.5.2 平均错误概率	248
7.5.3 选择指定的编码	252
7.5.4 讨 论	253
7.5.5 与分组正交信号构成方法的比较	254
7.6 信道容量	256

7.6.1 信道容量定理	256
7.6.2 容量定理的证明	258
7.6.3 负的描述的证明	260
7.6.4 正的描述的证明	265
7.7 可靠性函数	272
7.7.1 概 述	272
7.7.2 正交信号构成方法	272
习 题	275
第八章 传输信道	276
8.1 引 言	276
8.2 信道分类	276
8.3 消息运载媒体	277
8.3.1 有线信道	277
8.3.2 无线信道	280
8.4 信道标准	282
8.4.1 信道的性质	282
8.4.2 信道规范	282
8.5 信道模型	284
8.5.1 调制信道	285
8.5.2 编码信道	286
8.6 信道及其对数字信号传输的影响	287
8.6.1 恒参信道及其对数字信号传输的影响	287
8.6.2 变参信道及其对数字信号传输的影响	291
习 题	296
第九章 数字调制技术	297
9.1 概 述	297
9.2 线性调制(数字调幅)	299
9.2.1 线性调制信号的频谱	299
9.2.2 线性调制信号的产生与解调	303
9.3 数字调频	308
9.3.1 数字调频信号的频谱分析	308
9.3.2 数字调频信号的产生和解调	312
9.4 数字调相	321
9.5 双二进制部分响应与 AM/PSK	328
9.5.1 相关电平编码与双二进制技术	328
9.5.2 双二进制部分响应信号的频谱压缩	330
9.5.3 AM/PSK 调制技术	332
9.5.4 AM/PSK 调制的方式的实现	334

9.6	二进制振幅键控系统的抗噪声性能	337
9.7	二进制移频键控系统的抗噪声性能	341
9.8	二进制移相键控及差分相位键控(2PSK 及 2DPSK)系统的抗噪声性能	344
9.9	ASK、FSK、PSK(DPSK)系统性能比较	347
9.10	频分多路复用技术	346
	习 题	351
第十章	同步原理	352
10.1	引 言	352
10.2	载波同步	352
10.3	位同步的方法	354
10.4	帧同步	360
	习 题	362
第十一章	信道编码原理	364
11.1	引 言	364
11.2	信道编码的概念	366
11.3	常用的简单编码	367
11.4	线性分组码	369
11.5	循环码	374
11.5.1	循环码的基本概念	374
11.5.2	循环码的编码	379
11.5.3	循环码的译码	384
11.6	卷积码	388
11.6.1	卷积码的编、译码原理	388
11.6.2	卷积码的矩阵描述	390
	习 题	393
第十二章	编码系统的实现	396
12.1	发射机的实现	397
12.1.1	编码问题	397
12.1.2	R_i 导出的简要重述	399
12.1.3	奇偶校验码	400
12.1.4	二进制编码的集合体	403
12.1.5	$P\{e m_k\}$ 的不变性	406
12.1.6	正交和单一编码	407
12.2	接收机的量化	410
12.2.1	性能降低的度量	413
12.2.2	量化通道模型	414
12.2.3	R'_0 的计算	415

12.2.4	边界的公式	416
12.2.5	集合体内求平均	417
12.2.6	其边界的求值	417
12.2.7	二进制输入,二进制输出	419
12.2.8	二元输入,三元输出	421
12.3	二进制卷积编码	422
12.3.1	二进制对称通道	423
12.3.2	卷积编码器	425
12.3.3	树状结构	427
12.3.4	线 性	429
12.3.5	出错概率	431
12.3.6	次最佳解码	431
12.4	序列解码	433
12.4.1	树状搜索	433
12.4.2	基本概念	435
12.4.3	F _{ano} 算法	437
	习 题	443
	参考文献	444

第一章 绪 论

1.1 概 述

自人类存在以来,人类社会的活动基本上有三种形式,它是人类社会三大基本资源。一类活动属于物质材料的利用。例如,利用建筑材料建筑房屋,利用矿石冶炼钢铁,再利用钢铁制造各种工具。另一类活动归于能量的利用。人类最早对能量的利用应追溯到利用由于雷电使物质燃烧而产生的热能——火。后来人们想出了人工产生热能的方法——钻木取火。接着人们发现了对水利、风力资源的利用。近代人们开始利用电能、原子能。而另一类活动却往往为某些人所忽略,或视而不见,听而不闻。但这类活动却非常重要,对人类社会的发展起着十分重要的影响,这就是信息的交流,信息的形成、传输、存储、处理、交换和识别等技术的发展推动人类社会前进。

只要稍加考查便会发现关于信息的传递、存储、处理和利用,是伴随着人类社会发展的活动范围的扩大而相应发展起来的。在远古时期,人类分成部落,过着群居生活,他们传递消息的方式只限于手势、语言和图形符号。后来随着社会的发展,人类活动范围愈来愈大,为了在远距离通信,在消息传递方式上,出现了烽火台、驿站与信使、旗语及灯光信号。其中灯光、旗语和信使目前还仍然被人们运用着。随着人类活动范围遍及整个地球,特别是自本世纪以来,人类或人类利用工具的活动范围进入了宇宙空间,古老的通信方式已被电气通信所取代,伴随的是现代通信的出现和发展。即利用电能传播——电磁波和激光通信。在这种条件下人们的注意力不是放在利用电磁波传播的能量做功,而是它们变化的规律所代表的“状态”及其所起的实质性的作用。现在可以说,整个世界或人类能够达到的宇宙空间(包括利用工具)都被一些巨大的通信链条所覆盖着。它使人们在相距无论多么远的地方都几乎能“毫无延迟”的传递消息。

回顾整个通信的发展历史,通信的发展是与电技术的发展密不可分的。几乎没有一项电技术的发明在通信工程上没有立刻获得应用。自从1800年伏特发明了原电池,1820年奥斯特和安培发现了电磁机构,紧跟着在1832年亨利和1837年(又说1838年)莫尔斯演示了有线电报,使通信进入早期的数字方式。1864年天才的马克斯威尔开始总结科学家当时在电磁学上的发现,并在1873年提出马克斯威尔方程,预示了电磁能量的无线传播。紧接着赫兹在1880年证实了电磁波的存在。十年以后,马可尼和波波夫各自独立的发明了无线电报。其后通信工程的发展又促进了电技术的前进,1876年贝尔取得了电话的专利权,激励了许多电技术方法的发展,使通信进入模拟方式阶段。第二次世界大战期间及其以后信息工程取得巨大的进步,雷达、微波系统、晶体管与集成电路、通信卫星与激光通信,尤其是由冯·诺依曼所开创的计算机时代的到来更使信息工程进入了前所未有的兴旺时期,改变了过去人 \Rightarrow 人通信的一统天下,而变成了

人 \Leftrightarrow 人通信

人 \Leftrightarrow 机通信

机 \Leftrightarrow 机通信

共存的时代。

历史上,人 \Rightarrow 人通信可以在连续的时间内交换连续波形的信号,即以模拟信号为主。而人 \Rightarrow 机与机 \Rightarrow 机通信的出现。特别是计算机技术的出现和发展,使得在离散的時刻传递离散的信号,即数字信号变得越来越重要。近年来由于数字电路和微电子学的发展,特别是超大规模集成电路的发展使数字通信的优点变得越来越突出。甚至有数字通信完全代替模拟通信的趋向。当然在相当长一段时间内将处于两者并存的时期。

通信的数字化革命,以通信技术与微电子技术,计算机技术,特别是微处理机技术相结合为特征。微处理机应用到通信系统,使数字通信不仅与计算机技术相结合,而且正在融为一体,使通信系统向着不仅能传输话音,而且能传输各种数据、图像、文字、报表等其他信息。近年来,随着办公自动化和工厂自动化的兴起,渐渐发现局部区域计算机网络愈来愈显得不能满足用户对各种各样的信息的要求。越来越感到需要一种能在局部地区内提供各种信息业务的系统。这种系统语音和数据业务是密切相关的甚至是集成在一起的,它既能够经济而高效地处理现有通信业务和今后可能出现的多种多样的业务,又具有高度的交换性能。这当然是另一种新的网络体系结构的方案,它现正在形成将来的通信网络,这就是综合业务数据网——ISDN。(包括 B-ISDN)但据估计,从现在的通信网过渡到 ISDN 需要十年或几十年的时间,在此期间对通信业务要求较高的各局部区域或各单位通信网络必须采取一种用户网络方案,它即要满足早期对各种通信业务的要求,又要便于未来和 ISDN 接口。由此产生了综合业务局域网(ISLN)。从技术上看 ISLN 是 ISDN 的一个组成部分,它必须在同一接口、同一传输线和同一个交换设备上,提供包括:语音、数据和图像等各种信息业务。ISLN 的出现将为社会信息化、办公自动化和工厂自动化奠定一个坚实的基础。目前 ISLN、ATM、Internet 宽带网络等技术已经引起世界范围内的广泛注意。

通信工程通常被分成三个相互关联的方面。

1. 实现信息的处理和操作;信息处理包括信号放大,调制、解调、滤波等;
2. 为实现信息处理和操作所应用的元器件;
3. 为理解这些元器件及信息处理和操作机理的物理学。

虽然本门课程讲授的是这三个方面的第一方面,但这三个方面的发展却一直是相互联系相互促进的。通常一种新的元件的出现将导致一种新的信号处理操作的出现。比如:正是由于滤波器的出现,才可能产生频分复用,接着导致了奈奎斯特(Nyquist)对带限信号的研究。

1.1.1 通信理论的发展过程

人们知道,对信号可以进行一系列的处理,那么什么时候希望进行这些处理?进行这些处理获得的好处和它们的局限何在?等等。这些问题本身和对这些问题的解答构成了通信理论的主体。

随着计算机的出现和它能力的不断增长对信号处理提供的手段比过去任何时候都更精细、也更复杂。因而这些理论显得就更加重要了。现在让我们回顾一下整个通信理论发展的过程。

通信理论最早建立在奈奎斯特的工作基础之上。在 1924 年,他发展了 J.RCarson 的工作,并且得出结论:沿着一个带限通道,每秒钟可以传输的可分辨的脉冲数与信道的带宽成正比。更精确地说,在带宽为 W (CPS)的信道中, T 秒时间间隔内传递的可分辨脉冲数的

最大量为：

$$N_{\max} = KTW \quad (1.1)$$

式中 K 为比例常数,它取决于所传送的脉冲形状和信号所占有的频带,一般不大于 2。这是通信理论的起源,它奠定了数字通信的理论基础。

在图 1.1 中, u_i 为高频信号源。输出频率可变的脉冲序列, R 为负载,随着高频信号源输出的脉冲频率的变化,经信道传输后,接收端的脉冲形状就会变得模糊不清。当然,信道带宽越宽,所传输且可分辨的脉冲频率就越高。

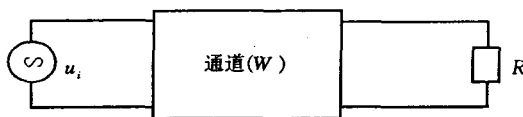


图 1.1 简化的信息传输模型

在 1928 年哈特莱(Hartley)推论,当奈奎斯特的结果与对接收机接收精度的限制结合起来的时候。意味着,沿着实际通道对能够进行可靠传输的数据量的限制。哈特莱提出的理论可归纳如下:

如果:

1. 被传输的脉冲信号幅度电压值在 $[-A, +A]$ 伏之间:

2. 接收机能够可靠估计信号幅度的精度是 $\pm\Delta$, 见图 1.2。

图中 $\pm\Delta$ 伏之间为接收机的灵敏度,当接收信号幅度小于 $\pm\Delta$ 伏时,接收机不能分辨接收的脉冲。图中 a, b, c 为接收机接收到的三个脉冲信号,显而易见, b, c 脉冲接收机可以分辨出来。而 a 和 b 脉冲接收机不能分辨出来,因为所接收的信号幅度的变化低于接收机的灵敏度,相当于信号被接收机及信道噪声所淹没。

哈特莱认为,在接收机中,接收脉冲幅度的最大可分辨等级数是 $(1 + \frac{A}{\Delta})$, 由此得到 KTW 个可分辨脉冲所构成的脉冲序列,其中每一个脉冲序列假定处在幅度等级 $(1 + A/\Delta)$ 中,则可能提供的可分辨的接收信号的总数是

$$M = (1 + A/\Delta)^{KTW} \quad (1.2)$$

式(1.2)表示了一种简单的但不太确切的含意,阐明了时隙 T 、信道带宽 W 、最大信号幅度 A 、接收机精度 Δ 之间的关系。式中 M 可视为最大允许的信源集合。

在图 1.3 中,构成发射机发出的 M 个可分辨的不同的消息序列,在时间 T 间隔内进行通信时发射机发出的可分辨的脉冲序列。

由图 1.3 可以看出,仅当构成两个脉冲序列的脉冲幅度,至少有一个是可分辨的时候,

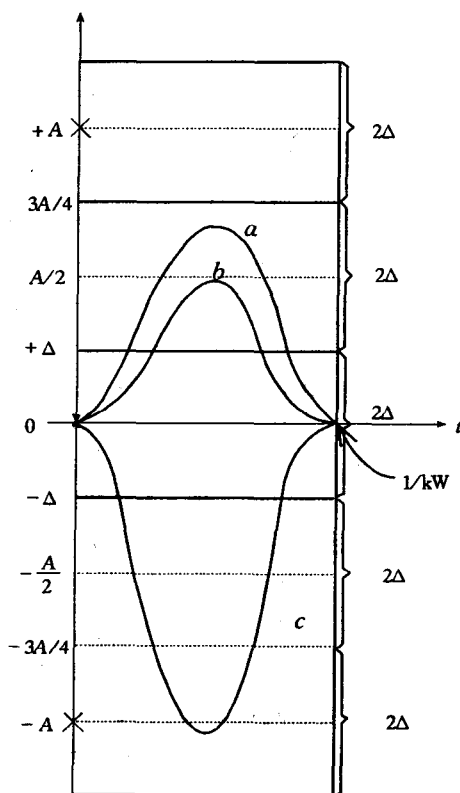


图 1.2 接收机可分辨的脉冲幅度示意图

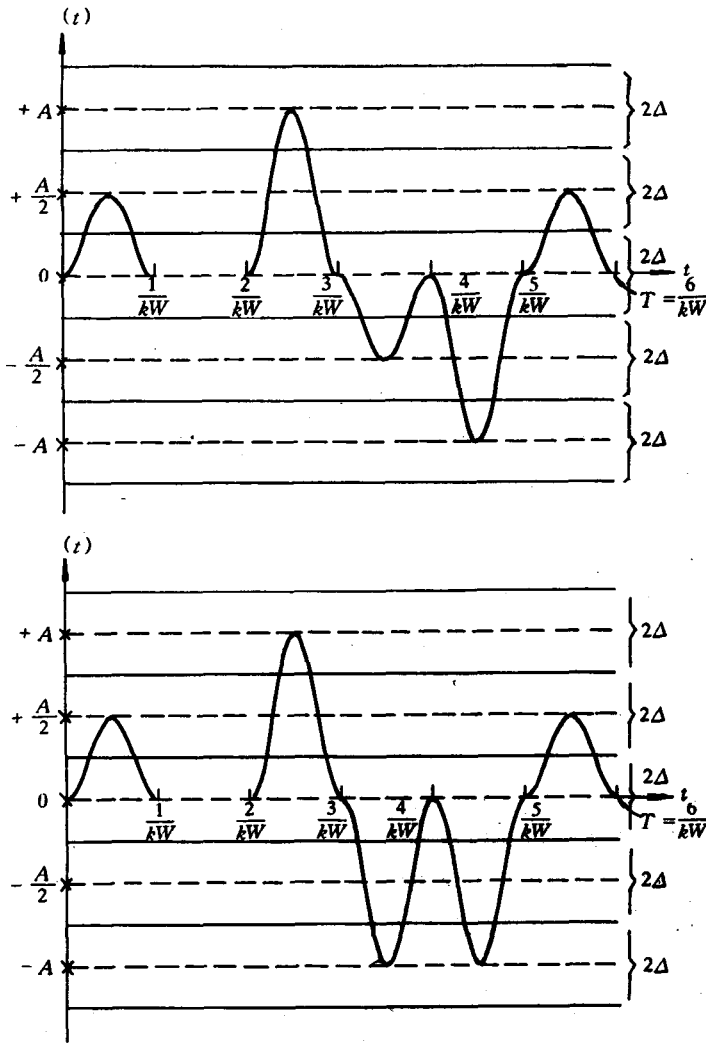


图 1.3 发射机发出的可分辨的脉冲序列

这两个被接收的脉冲序列 $s_i(t)$ 与 $s_j(t)$ 才是可分辨的。

图中 $A/\Delta = 4$, $KTW = 6$ 则 $M = 5^6 = 15625$ 个。 $s_i(t)$ 和 $s_j(t)$ 脉冲序列处于两个不同等级, 能在接收机中将其分辨出来, 也能将 15625 个脉冲序列分辨出来。如果我们企图把脉冲序列数提高到超过由 (1.2) 式所指定的数量, 这无论是用发送超过 KTW 个脉冲的方法, 还是缩小脉冲幅度间隔使其小于 2Δ 或以增加幅度等级的方法, 接收机都不再能可靠的分辨全部的脉冲序列。因而通信也就不再可靠。

如果把 $M = (1 + A/\Delta)^{KTW}$ 个可分辨的脉冲序列和 M 个消息一一对应, 比如 $m_0, m_1, m_2, \dots, m_{M-1}$, 并且当输入的消息是 m_K 时才发送第 K 个脉冲序列当然在时间 T 内可以可靠的传送这 M 个消息中的一个。按照哈特莱理论构成的通信系统模型如图 1.4 所示。

通信理论还讨论最大信号幅度 A 、接收机精度 Δ 、信道带宽 W 、时间间隔 T 和最大可提供的可分辨的接收信号的总数量 M 之间的关系。

通信理论还讨论。在发射机中, 适当的进行信号处理的方法(波形设计), 使被传送的消

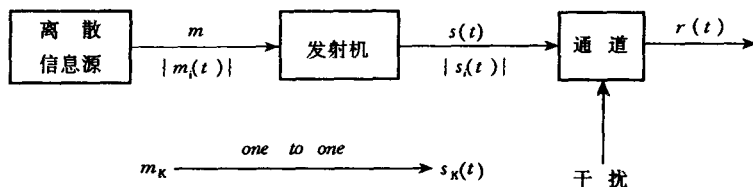


图 1.4 离散信息传输模型

息可分辨为最大。讨论如何在接收机里,对接收信号进行处理,使得在经济允许的条件下尽可能对信号进行正确地判决。同时也讨论如何降低发射和接收信号处理器的复杂性等。

1.1.2 通信的随机性

通信的本质是随机的。随机性在通信中起重要作用且与信息密切相关。如果听众事先准确知道讲演者将要说什么,采用什么手势和音调来演讲,那就完全没有必要去听他的演讲。因而通信理论假定,发射机连接到一个接收机不能准确预测的随机信源上,发送端将要传送什么样的信息,对接收者来说是无法预料的。否则就不存在着通信的必要了。

通信随机性的第二点指的是被发送的信号,在传输中或在接收端,会受到随机形式的干扰(随机噪声)。随机干扰限制着通信速率。在有随机噪声存在的通信中,无法断定接收端恢复的消息未发生差错。否则绝不会有通信问题的存在。虽然这个问题不像前面的问题那样明显,但确实是一个真理。

为了阐明这一问题,让我们举一个例子,大家知道在计算机通信网中,图书及文件资料的检索是一项重要内容。网络中庞大的数据库管理系统(如 DIALOG 文件专利检索系统)可以把世界上千百万份文件、资料书籍和专利存储起来以备检索。以英文(不包括汉字)形式传输一本英文图书的内容为例。假定字集是由 64 个符号组成的,而每个符号用六位二进制数所表达,即:

```

a : 0 0 0 0 0 0
b : 0 0 0 0 0 1
c : 0 0 0 0 1 0
  :
9 : 1 1 1 1 1 1

```

实质上,任何被检索的内容,可以被写成同样长度的二进制符号的序列(即 0 或 1 的序列)。比如前六个数表示内容的第一个字母,下六个数表示第二个字母,并以此类推。最后如果小数点放在该序列的开始,则可把合成的二进制序列解释成为一个处在 0 和 1 之间的数。如果把整个内容指定为某个幅度的奈奎斯特脉冲,我们仅仅需要调整脉冲幅度等于它所代表二进制数的值。被发射的脉冲幅度真的可以被非常精确决定的话,那就不仅仅是一卷书,即使整个图书馆的书籍的全部内容也可以简单的用传送一个恰如其分的精确幅度值的奈奎斯特脉冲所代表。无疑这是非常荒谬的。因为一些微小的随机干扰(通常称之为噪声)总是要包括在发射机、通道和接收机中,因而不可能以那种不可想象的精度,进行幅度的测量。哈特莱的结果公式(1.2)中的 Δ 意味着受噪声影响的精度的量化参数。

1.1.3 通信问题的概率模型

虽然哈特莱认识了在整个通信过程中,噪声和随机干扰的重要性。并在他的公式(1.2)