

21 世纪高等学校电子信息类教材

通信原理教程

樊昌信 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书在简要介绍模拟通信原理的基础上,以数字通信原理为重点,讲述通信系统的组成、性能指标、工作原理、性能分析和设计方法。对于近年来新出现的通信体制和技术给予了充分的重视。

本书适用于普通高等学校工科电子类专业,作为本科3、4年级和研究生1年级的教科书或参考书,也可供从事通信专业工作的工程技术人员作为参考书或进修课程教材。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理教程/樊昌信编著. —北京:电子工业出版社,2004.5

21世纪高等学校电子信息类教材

ISBN 7-5053-9881-4

I.通... II.樊... III.通信理论-高等学校-教材 IV.TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第036982号

责任编辑:韩同平

印 刷:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:23.25 字数:595千字

印 次:2004年5月第1次印刷

印 数:6000册 定价:29.00元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010)68279077。质量投诉请发邮件至 zts@phei.com.cn 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前 言

近年来,通信理论和技术有着迅猛的发展。在我国,电信业务的应用已经深入到千家万户,庞大的现代通信网已经成为国家的重要基础设施之一。我国大陆的电话普及率在1980年时仅为0.43%,到2003年底固定电话主线普及率和移动电话普及率已经分别迅速达到20.5%和20.8%,这相当于普及率增长了约100倍;因特网上网人数已达到7800万人,居世界第二位。与此相应,我国电信企、事业单位的数量和其中从业人员的数量也大量增加。在这种形势下,电信专业新生力量的培养和在职人员的再教育是一项重要的任务。为了适应这一形势发展的需要,特编写了这本教科书。

目前的通信网已经基本上实现了数字化。在我国公共通信网中传输的信号主要是数字信号,恐怕只有用户环路中传输的信号,和个别特殊应用中传输的信号,还是模拟信号。因此,本书中将讨论模拟信号传输技术的篇幅压缩到了最低程度,而将绝大部分章节用于讨论数字通信,包括数字信号的变换、编码和传输,以及模拟信号的数字化。

在讨论数字通信技术的章节中,对于某些较新的通信技术给予了应有的重视,例如网格编码调制(TCM)、正交频分调制(OFDM)、多址技术、扩谱技术和TURBO码等。在叙述中还注意结合卫星通信和计算机通信等当前发展迅速的网络中的应用实例进行讲解。由于在通信技术领域中外引进的新名词术语和缩略语很多,为了方便读者阅读其他资料,本书中在许多中文名词第一次出现的同时还给出相应的英文名词和缩略语。

为了尽量适应不同学校的教学和在职读者的需要,本书将全部内容分为两篇。第一篇为基本内容,是入门者必读的。第二篇为选读内容,各章都有相对独立性,可以根据不同教学要求选学其中部分章节,也适合通信工程技术人员作为参考资料选读所需部分。此外,为了照顾不同教学计划和不同教学时间的需求,对于一些较烦琐的计算和数学证明等内容,采用不同的字号和字体排印(小五号楷体),在学习中可视情况跳过这些部分,不会影响对后面章节内容的理解。各章末皆附有思考题和习题。思考题协助读者复习本章内容,可以起到由读者自己对本章内容作小结的作用;而习题则可以促使读者深入领会本章内容,将理论联系实际,提高解决实际问题的能力。书后还附有少量参考文献,供读者查阅有关结论的出处。书中没有列出更多的参考文献,因为在这网络信息时代,读者可以很容易地从因特网上获得所需的资料。

第一篇共有7章。第1章重点介绍通信,特别是数字通信和信道的基本概念,使读者建立初步的认识。第2章深入讨论信号的特性和信道对信号传输的影响。第3章简要阐明模拟调制系统的原理。第4章详细讨论模拟信号的抽样、量化和编码方法。第5章对基带传输系统设计的各个方面做了基本介绍。第6章对几种基本的数字调制系统做了较详细和深入的讨论。第7章讨论数字通信系统中必不可少的同步,包括载波同步、位同步、群同步和网同步方法。

第二篇共有7章。第8章从数字信号最佳接收的角度讨论系统的理想性能,并与实际系统性能作比较。第9章讲述多路复用、复接和多址接入技术,并且特别介绍了主要的国际标准建议和一些实用体制。第10章讨论纠错编码和差错控制技术,着重介绍了各种性能优良的纠错码的原理。第11章是在第6章的基础上较全面地讨论各种先进的数字调制技术。第12章

阐述信息理论,这是从基本理论上分析通信系统的性能,寻找最佳的信源编码方法和通信系统的最佳性能。第 13 章介绍各种通信网,包括电话网、数据通信网、综合业务数字网和移动通信网。第 14 章简要介绍密码学原理。第二篇的各章都具有相对的独立性,可根据需要从中选学,不会因跳过某章而影响理解(只是第 10 章中的维特比译码算法和第 11 章中的 TCM 有一定的联系)。

本书的参考学时数为 36~90(或 2 至 5 个学分),可安排成一学期或两学期的课程,并辅以相应的实验课。

学习本课程的先修课程主要有:模拟电子线路、高频电子线路、数字逻辑电路、线性代数、概率论,以及信号与系统。对于学习过“信号与系统”的学生,本书的第 2 章可以作为复习性的介绍或跳过。

本书的编写,得到了西安电子科技大学通信工程学院、综合业务网国家重点实验室和信息科学研究所各级领导的大力支持,以及本人所在的小组中吴宇红、张岗山、刘炯、冯磊和周战琴等同志多方面的帮助。在此一并致谢。

限于作者水平,书中错误疏漏在所难免,殷切希望广大读者批评指正。

编著者
于西安电子科技大学

本书中的文字符号及其说明

a	平均值	k	整数
a_i	预测系数	K	整数, 密钥长度
A	安培, 地址字段	l	码字长度
A	振幅, 流入话务量	L	平均码字长度
A_0	成功话务量	m	调幅度
b	比特	M	量化电平数
B	带宽, 呼损率	$m(t)$	调制信号
B	字节	m_f	调制指数
c	常数	n	整数, 正整数
C	控制字段	n_0	白噪声单边功率谱密度
C	信道容量	N	正整数, 噪声功率
$C(f)$	信道的传输函数	N_0	唯一解距离
$C(jn\omega)$	周期性功率信号的频谱	N_q	量化噪声功率的平均值
E	能量	p	预测阶数, 整数
Erl	爱尔兰	P	功率, 信号平均功率, 概率
e_k	预测误差	$P(f)$	信号功率谱密度
$\text{erf}(x)$	误差函数	$p_X(x)$	X 的概率密度
$\text{erfc}(x)$	补误差函数	$P(X \leq x)$	$X \leq x$ 的概率
F	标志字段, 帧	$P(X, Y)$	联合概率
f_m	调制信号频率	$P(X/Y)$	条件概率
f_0	载波频率	$P(y_j/x_i)$	转移概率
f_s	抽样频率	pix	像素
$F(\omega)$	频谱密度	pkt	分组
$F_X(x)$	X 的概率分布函数	q_k	量化误差
FCS	帧校验序列	r	信号噪声功率比, 信息的冗余度百分比, 码元速率
$G(f)$	信号能量谱密度	R	电阻
$G_T(f)$	发送滤波器的传输函数	R_b	信息速率
$G_R(f)$	接收滤波器的传输函数	R_B	码元速率
H	熵	r_k	量化预测误差
$H(f)$	传输函数	$R(j)$	数字信号的自相关函数
Hz	赫兹	$R(\tau)$	自相关函数
I	信息帧	$R_{12}(\tau)$	互相关函数
I	电流, 信息量	REJ	拒绝
J	焦耳		

RNR	未准备好接收	X	随机变量 ,信源 ,明文
RR	准备好接收	$X(t)$	随机过程
s	秒	$X_i(t)$	随机过程的一个实现
S	信号电压或电流 ,信号功率	Y	密文
S	监督帧	$y(t)$	信号加噪声电压
s_k	信号抽样值	Z	密钥
s_q	量化信号值	$\delta(t)$	单位冲激函数
SREJ	选择性拒绝	$\delta_T(t)$	周期性单位冲激函数
$S(f)$	能量信号的频谱密度 ,即 $s(t)$ 的傅里叶变换	Δ	量化台阶
$s(t)$	信号时间波形	Δf	频带宽度 ,调制频移
$Sa(t)$	抽样函数	$\Delta(f)$	单位冲激函数的频谱密度
T	码元持续时间	Δv	量化间隔
T_b	每比特的持续时间	α	本原元
U	无编号帧	σ	标准偏离
$u(t)$	单位阶跃函数	σ^2	方差
V	伏特	$\phi(x)$	概率积分函数
V	电压	φ_0	初始相位
W	瓦特	ω_0	载波角频率
x	随机变量的取值	Ω	欧姆

目 录

第 一 篇

第 1 章 概论	(1)
1.1 通信的发展	(1)
1.2 消息、信息和信号	(1)
1.3 数字通信	(3)
1.3.1 基本概念	(3)
1.3.2 数字通信的优点	(4)
1.3.3 数字通信系统模型	(4)
1.3.4 数字通信系统的主要性能指标	(6)
1.4 信道	(8)
1.4.1 无线信道	(8)
1.4.2 有线信道	(13)
1.4.3 信道模型	(15)
1.4.4 信道特性对信号传输的影响	(16)
1.5 信道中的噪声	(19)
1.6 小结	(20)
思考题	(20)
习题	(20)
第 2 章 信号	(22)
2.1 信号的类型	(22)
2.1.1 确知信号和随机信号	(22)
2.1.2 能量信号和功率信号	(22)
2.2 确知信号的性质	(23)
2.2.1 频域性质	(23)
2.2.2 时域性质	(29)
2.3 随机信号的性质	(30)
2.3.1 随机变量的概率分布	(30)
2.3.2 随机变量的概率密度	(31)
2.4 常见随机变量举例	(32)
2.5 随机变量的数字特征	(33)
2.5.1 数学期望	(33)
2.5.2 方差	(34)
2.5.3 矩	(34)
2.6 随机过程	(35)

2.6.1	随机过程的基本概念	(35)
2.6.2	平稳随机过程	(36)
2.6.3	各态历经性	(36)
2.6.4	平稳随机过程的自相关函数和功率谱密度	(37)
2.7	高斯过程	(42)
2.8	窄带随机过程	(45)
2.8.1	窄带随机过程的基本概念	(45)
2.8.2	窄带随机过程的性质	(46)
2.9	正弦波加窄带高斯过程	(48)
2.10	信号通过线性系统	(49)
2.10.1	线性系统的基本概念	(49)
2.10.2	确知信号通过线性系统	(50)
2.10.3	随机信号通过线性系统	(53)
2.11	小结	(55)
	思考题	(56)
	习题	(57)
第3章	模拟调制系统	(59)
3.1	概述	(59)
3.2	线性调制	(59)
3.2.1	振幅调制(AM)	(60)
3.2.2	双边带(DSB)调制	(62)
3.2.3	单边带(SSB)调制	(63)
3.2.4	残留边带(VSB)调制	(64)
3.3	非线性调制	(65)
3.3.1	基本原理	(65)
3.3.2	已调信号的频谱和带宽	(67)
3.3.3	角度调制信号的接收	(69)
3.4	小结	(69)
	思考题	(69)
	习题	(70)
第4章	模拟信号数字化	(71)
4.1	引言	(71)
4.2	模拟信号的抽样	(71)
4.2.1	低通模拟信号的抽样	(71)
4.2.2	带通模拟信号的抽样	(73)
4.2.3	模拟脉冲调制	(76)
4.3	抽样信号的量化	(76)
4.3.1	量化原理	(76)
4.3.2	均匀量化	(77)
4.3.3	非均匀量化	(78)

4.4	脉冲编码调制.....	(83)
4.4.1	脉冲编码调制(PCM)的基本原理	(83)
4.4.2	自然二进制码和折叠二进制码	(84)
4.4.3	PCM系统的量化噪声	(86)
4.5	差分脉冲编码调制.....	(87)
4.5.1	差分脉冲编码调制(DPCM)的原理	(87)
4.5.2	DPCM系统的量化噪声和信号量噪比	(88)
4.6	增量调制.....	(89)
4.6.1	增量调制原理	(89)
4.6.2	增量调制系统中的量化噪声	(90)
4.7	小结.....	(92)
	思考题	(92)
	习题	(93)
第5章	基带数字信号的表示和传输	(94)
5.1	概述.....	(94)
5.2	字符的编码方法.....	(94)
5.3	基带数字信号的波形.....	(95)
5.4	基带数字信号的传输码型.....	(96)
5.5	基带数字信号的频率特性.....	(98)
5.5.1	计算 $v_c(t)$ 的功率谱密度	(99)
5.5.2	计算 $u_c(t)$ 的功率谱密度	(100)
5.5.3	计算 $s_c(t)$ 的功率谱密度	(101)
5.5.4	功率谱密度计算举例	(101)
5.6	基带数字信号传输与码间串扰	(102)
5.6.1	基带数字信号传输系统模型	(102)
5.6.2	码间串扰及奈奎斯特准则	(103)
5.6.3	部分响应系统	(105)
5.7	眼图	(109)
5.8	时域均衡器	(111)
5.8.1	概述	(111)
5.8.2	横向滤波器基本原理	(111)
5.8.3	横向滤波器的实现	(114)
5.9	小结	(115)
	思考题.....	(116)
	习题.....	(116)
第6章	基本的数字调制系统.....	(119)
6.1	概述	(119)
6.2	二进制振幅键控(2ASK).....	(120)
6.2.1	基本原理	(120)
6.2.2	功率谱密度	(121)

6.2.3	误码率	(122)
6.3	二进制频移键控(2FSK).....	(127)
6.3.1	基本原理	(127)
6.3.2	功率谱密度	(128)
6.3.3	最小频率间隔	(130)
6.3.4	误码率	(130)
6.4	二进制相移键控(2PSK).....	(133)
6.4.1	基本原理	(133)
6.4.2	功率谱密度	(135)
6.4.3	误码率	(136)
6.5	二进制差分相移键控(2DPSK)	(137)
6.5.1	基本原理	(137)
6.5.2	功率谱密度	(139)
6.5.3	误码率	(140)
6.6	二进制数字键控传输系统性能比较	(143)
6.7	多进制数字键控	(144)
6.7.1	多进制振幅键控(MASK)	(145)
6.7.2	多进制频移键控(MFSK)	(146)
6.7.3	多进制相移键控(MPSK)	(149)
6.7.4	多进制差分相移键控(MDPSK)	(152)
6.7.5	振幅/相位联合键控(APK).....	(157)
6.7.6	多进制数字键控实用系统举例	(159)
6.8	小结	(160)
	思考题.....	(160)
	习题.....	(161)
第7章	同步.....	(162)
7.1	概述	(162)
7.2	载波同步方法	(162)
7.2.1	插入导频法	(163)
7.2.2	直接提取法	(164)
7.2.3	载波同步性能	(166)
7.3	位同步	(168)
7.3.1	外同步法	(168)
7.3.2	自同步法	(168)
7.3.3	位同步误差对误码率的影响	(171)
7.4	群同步	(171)
7.4.1	概述	(171)
7.4.2	集中插入法	(173)
7.4.3	分散插入法	(174)
7.4.4	群同步性能	(176)

7.5 网同步	(177)
7.5.1 概述	(177)
7.5.2 开环法	(177)
7.5.3 闭环法	(179)
7.6 小结	(180)
思考题.....	(181)
习题.....	(182)

第 二 篇

第 8 章 数字信号最佳接收原理.....	(183)
8.1 数字信号的统计表述	(183)
8.2 数字信号的最佳接收准则	(184)
8.3 确知数字信号的最佳接收机	(186)
8.4 确知数字信号最佳接收机的误码率	(188)
8.5 随相数字信号的最佳接收	(192)
8.6 起伏数字信号的最佳接收	(194)
8.7 实际接收机和最佳接收机的性能比较	(196)
8.8 数字信号的匹配滤波接收原理	(196)
8.8.1 数字信号的匹配滤波接收法	(196)
8.8.2 数字信号的相关接收法	(200)
8.9 最佳基带传输系统	(201)
8.10 小结.....	(204)
思考题.....	(204)
习题.....	(205)
第 9 章 多路复用和多址技术.....	(206)
9.1 概述	(206)
9.2 频分复用(FDM)	(207)
9.3 时分复用(TDM).....	(209)
9.3.1 准同步数字体系(PDH)	(210)
9.3.2 复接与码速调整	(213)
9.3.3 同步数字体系(SDH)	(215)
9.4 码分复用(CDM)	(217)
9.4.1 基本原理	(217)
9.4.2 正交码	(219)
9.4.3 伪随机码	(221)
9.5 多址技术	(226)
9.5.1 频分多址	(226)
9.5.2 时分多址	(227)
9.5.3 局域网中的多址技术	(233)
9.6 小结	(236)

思考题.....	(237)
习题.....	(238)
第 10 章 信道编码和差错控制	(240)
10.1 概述.....	(240)
10.2 纠错编码的基本原理.....	(242)
10.3 纠错编码系统的性能.....	(244)
10.4 奇偶监督码.....	(245)
10.4.1 一维奇偶监督码	(245)
10.4.2 二维奇偶监督码	(246)
10.5 线性分组码.....	(247)
10.6 循环码.....	(251)
10.6.1 循环码的概念	(251)
10.6.2 循环码的运算	(252)
10.6.3 循环码的编码方法	(255)
10.6.4 循环码的解码方法	(255)
10.6.5 截短循环码	(256)
10.6.6 BCH 码	(256)
10.6.7 RS 码	(258)
10.7 卷积码.....	(258)
10.7.1 卷积码的编码	(258)
10.7.2 卷积码的解码	(259)
10.8 Turbo 码	(263)
10.9 小结.....	(266)
思考题.....	(267)
习题.....	(267)
第 11 章 先进的数字带通调制和解调	(269)
11.1 概述.....	(269)
11.2 偏置正交相移键控及 $\pi/4$ 正交差分相移键控	(269)
11.3 最小频移键控及高斯最小频移键控.....	(270)
11.3.1 MSK 信号的基本原理	(270)
11.3.2 MSK 信号的相位连续性	(271)
11.3.3 MSK 信号的正交表示法	(272)
11.3.4 MSK 信号的产生和解调	(274)
11.3.5 MSK 信号的功率谱	(276)
11.3.6 MSK 信号的误码率性能	(277)
11.3.7 高斯最小频移键控	(277)
11.4 正交频分复用.....	(277)
11.4.1 概述	(277)
11.4.2 OFDM 的基本原理	(278)
11.4.3 OFDM 的实现	(280)

11.5	网格编码调制.....	(282)
11.5.1	网格编码调制的基本概念.....	(282)
11.5.2	TCM 信号的产生.....	(282)
11.5.3	TCM 信号的解调.....	(284)
11.6	扩展频谱技术.....	(285)
11.6.1	概述.....	(285)
11.6.2	直接序列扩谱.....	(286)
11.6.3	跳频扩谱.....	(288)
11.6.4	扩谱码的同步.....	(288)
11.6.5	分离多径技术.....	(289)
11.7	小结.....	(291)
	思考题.....	(291)
	习题.....	(292)
第 12 章	信息理论	(293)
12.1	离散信源的熵.....	(293)
12.2	离散信道模型.....	(294)
12.3	联合熵和条件熵.....	(295)
12.4	无噪声信道容量.....	(295)
12.5	信源编码.....	(297)
12.5.1	无噪声信道编码原理.....	(297)
12.5.2	信源编码的分类和效率.....	(300)
12.5.3	扩展二进制信源的熵.....	(300)
12.5.4	香农-费诺码.....	(301)
12.5.5	霍夫曼码.....	(302)
12.6	白色加性高斯噪声信道的容量.....	(302)
12.7	小结.....	(305)
	思考题.....	(306)
	习题.....	(306)
第 13 章	通信网	(308)
13.1	通信网的类型.....	(308)
13.2	电话网.....	(309)
13.2.1	电话网的结构.....	(309)
13.2.2	电话网中的交换.....	(310)
13.2.3	电话网中的信令.....	(310)
13.2.4	电话网的性能指标.....	(311)
13.3	数据通信网.....	(313)
13.3.1	概述.....	(313)
13.3.2	数据通信网中的交换.....	(313)
13.3.3	分组交换原理.....	(314)
13.3.4	开放系统互连参考模型.....	(315)

13.4	综合业务数字网(ISDN)	(317)
13.4.1	窄带综合业务数字网(N-ISDN)	(317)
13.4.2	宽带综合业务数字网(B-ISDN)	(319)
13.5	移动通信网	(322)
13.6	小结	(327)
	思考题	(328)
	习题	(329)
第 14 章	通信安全	(330)
14.1	概述	(330)
14.2	单密钥加密通信系统	(330)
14.3	分组密码和流密码	(331)
14.4	用信息论研究密码的方法	(333)
14.4.1	完善安全性	(333)
14.4.2	唯一解距离	(334)
14.4.3	数据压缩在密码编码中的作用	(335)
14.4.4	扩散与混淆	(335)
14.5	数据加密标准	(336)
14.6	公共密钥密码编码方法	(338)
14.7	RSA 算法	(340)
14.8	小结	(341)
	思考题	(342)
	习题	(342)
附录 A	巴塞伐尔(Parseval)定理	(343)
附录 B	误差函数值表	(344)
附录 C	七位美国标准信息交换码(ASCII)	(346)
附录 D	CCITT 5 号码	(347)
附录 E	我国标准 7 位编码字符集	(348)
附录 F	贝塞尔函数值表	(349)
附录 G	伽罗华域 $GF(2^m)$	(350)
	英文缩略词英汉对照表	(351)
	参考文献	(355)

第一篇

第 1 章 概 论

1.1 通信的发展

在有悠久历史的中国,通信的起源至少可以追溯到周朝。众所周知,中国历史上周幽王(公元前 781~公元前 771 年)烽火嬉诸侯的故事。这个故事就是古代应用光通信的见证,它证明光通信在中国的应用至少可以追溯到公元前 800 年,这在世界上也是领先的。烽火是非常原始的光通信,而且是最简单的二进制数字通信。它利用有或无光信号表示有或无“敌情”。广义地说,通信是传递信息。目前,通信方式主要有两类:利用人力或机械的方式传递信息,例如常规的邮政,称之为运动通信;或者是利用电(包括电流、无线电波或光波)传递信息,即电信。本书的讨论仅限于后者。

近代电通信技术始于 1820 年安培(A. M. Ampère)发明的电报通信,这是近代数字通信的开始^[1]。此后,电报通信技术不断地改进,并得到迅速发展和广泛应用;特别是莫尔斯(Samuel F. B. Morse)于 1838 年前后将电报通信推向实用^[1 2]。贝尔(A. G. Bell)于 1876 年发明了电话^[3],这是模拟通信的开始。由于电话通信是一种实时、交互式通信,比电报更便于使用,所以在 20 世纪前半叶这种采用模拟技术的电话通信技术和电话通信网,比电报得到了更迅速和广泛的发展。到了 20 世纪 60 年代以后,随着半导体、计算机和激光技术的出现和发展,传输字符和计算机数据的数字通信技术进入了高级发展阶段。由于这种高级数字通信技术在许多方面都优于模拟通信,甚至像语音、图像一类的模拟信号也希望采用数字通信技术来传输。因此,近 20 多年来数字通信得到迅猛的发展。与此同时,作为高级光通信技术的光纤通信技术也与其携手同行,两者都成为现代通信网的主要支柱。

上述光通信和数字通信发展的历史过程,都是从其低级形式走向高级形式的发展过程。

1.2 消息、信息和信号

通信的目的是传递消息中包含的信息。例如,语音、文字、图形、图像等都是消息(message)。人们接收消息,关心的是消息中包含的有效内容,即信息(information)。例如,在传递天气预报时,“晴天”可以用汉字表示,也可以用一种符号或图形表示。这些表示是不同形式的消息,但是它们却载有相同的信息。消息必须转换成为电信号(通常简称为信号),才能在通信系统中传输。所以,信号(signal)是传输消息的手段,信号是消息的载体。

信息是消息中包含的有意义的内容,或者说有效内容。我们还提到不同形式的消息可以

包含相同的信息。类似于运输货物多少采用“货运量”来衡量一样,传输信息的多少可使用“信息量(information content)”来衡量。所以如何度量信息是首先要解决的问题。

消息是多种多样的。因此度量消息中所含的信息量的方法,必须能够用来度量任何消息,而与消息的类型无关。同时,这种度量方法也应该与消息的重要程度无关。

在一切有意义的通信中,对于接收者而言,同样消息量中包含的信息量可能不同。例如,发布天气预报“明天降雨量将有 1 mm”不会使接收者认为有什么奇怪,而预报“明天降雨量将有 1 m”则会使接收者大吃一惊。这表明,消息中确有可能包含不同的信息量。消息所表达的事件越不可能发生,越使人感到意外,则信息量就越大。因此,我们可以从事件的不确定程度,即其发生的概率来描述其信息量的大小。确知的消息,例如“明日太阳将从东方升起”,没有必要传输,因为接收者对其丝毫不感兴趣。也就是说,这种确知的消息中信息量为 0。

概率论告诉我们,事件的不确定程度可以用其出现的概率来表述。若用概率来描述信息量,则消息所表达的事件出现的概率越小,其中包含的信息量就越大。如果(消息所表达的)事件是必然的,其发生概率等于 1,则消息的信息量等于 0。事件发生概率越小,则其信息量应该越大。如果事件是不可能的,其发生概率等于 0,则消息将含有无限的信息量。另外,如果接收到的消息是由若干个独立事件构成的,则接收到的总信息量应该是这些独立事件的信息量的总和。

综上所述,消息中所含的信息量 I 可以按如下方法定义:

(1) 消息中所含的信息量 I 是该消息出现概率 $P(x)$ 的函数,即

$$I = I[P(x)] \quad (1.2-1)$$

(2) 消息出现的概率越小,它所含的信息量越大;反之则信息量越小。当 $P(x) = 1$ 时, $I = 0$ 。

(3) 假设若干个独立事件的出现概率分别是 $P(x_1), P(x_2), P(x_3), \dots$, 则由这些独立事件构成的消息所含的信息量等于传输各独立事件的各个消息的信息量的总和,即

$$I[P(x_1)P(x_2)\dots] = I[P(x_1)] + I[P(x_2)] + \dots \quad (1.2-2)$$

容易看出,若 I 与 $P(x)$ 之间的关系为:

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.2-3)$$

则上述三项要求可以满足。所以,我们将式(1.2-3)作为消息 x 所含信息量 I 的定义。 I 的单位和对数的底 a 有关。如果 $a = 2$, 则信息量的单位为比特(bit),通常简记为 b;如果 $a = e$, 则信息量的单位为奈特(nat);如果 $a = 10$, 则信息量的单位为哈特莱(hartley)。通常,采用比特作为单位最为广泛,即有

$$I = -\log_2 P(x) \quad (1.2-3a)$$

现在,首先讨论等概率出现的离散消息的信息含量。假设需要传输 M 个独立的等概率离散消息之一,则采用一个 M 进制的波形来传送就行了。也就是说,传送 M 个离散消息之一和传送 M 进制波形之一是等价的。当 $M = 2$ 时,即二进制时,式(1.2-3a)变为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/2} = \log_2 2 = 1 \quad (b) \quad (1.2-4)$$

如上式所示,通常选用以 2 为对数的底是很方便的,因为这时一个二进制波形的信息量恰好等于 1 b。在工程上,常常不考虑其是否为等概率的消息,总是认为一个二进制波形(或码元)等于 1 b。这就是说,在工程应用中,通常把一个二进制码元称做 1 b,这就把原来的信息量

的单位变成了信号(二进制码元)的单位了。这一点对于初学者来说一定要注意,在概念上不能混淆。

按照式(1.2-3a)的定义,当 $M > 2$ 时,每一码元的信息量为

$$I = \log_2 \frac{1}{1/M} = \log_2 M \quad (b) \quad (1.2-5)$$

若 M 是 2 的整次幂,例如 $M = 2^k (k = 1, 2, 3, \dots)$, 则式(1.2-5)变成

$$I = \log_2 2^k = k \quad (b) \quad (1.2-6)$$

1.3 数字通信

1.3.1 基本概念

如前所述,通信的目的是传递消息。例如,语音、文字、图形、图像等都是消息。代表消息的电信号,按其代表消息的参量的取值方式不同,可以分为两类。第一类称为模拟信号,或称连续信号;例如话筒送出的语音信号,其电压(和电流)可用取值连续的时间函数表示。第二类称为数字信号,又称离散信号;例如代表文字的编码和计算机数据信号,其电压(和电流)仅可能取有限个离散值。这里需要注意的是,区分模拟信号和数字信号的准绳,是看其取值是连续的还是离散的,而不是看时间。数字信号在时间上可以是连续的,模拟信号在时间上也可能是离散的。用最简单的波形表示的情况下,代表数字信号一个取值的波形称为一个码元,见图 1.3.1。

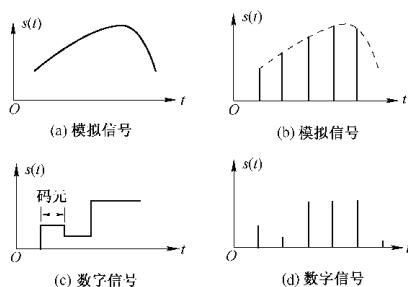


图 1.3.1 模拟信号和数字信号

和上述信号的分类方法相对应,通信和通信系统也可以分为数字通信和模拟通信,以及数字通信系统和模拟通信系统。无论是模拟还是数字通信系统,其中总是存在噪声和其他干扰,并由之引起传输信号的失真,影响信号传输的质量。通信系统设计的基本问题之一就是解决这些噪声和干扰的影响。

在上述信号的分类方法相对应,通信和通信系统也可以分为数字通信和模拟通信,以及数字通信系统和模拟通信系统。无论是模拟还是数字通信系统,其中总是存在噪声和其他干扰,并由之引起传输信号的失真,影响信号传输的质量。通信系统设计的基本问题之一就是解决这些噪声和干扰的影响。

在模拟通信系统中,传输的是连续的模拟波形,携带信息的是其取值连续变化的某个参量,例如模拟波形的幅度。这时,要求在接收端能以高保真度来复现原发送的模拟波形。对于此类系统传输质量的度量准则主要是输出信号噪声功率(或电压)比,简称信噪比。信噪比代表系统输入波形与输出波形之间的均方(或均方根)误差。因此,在理论上,模拟通信系统中的基本问题是连续波形的参量估值问题。

在数字通信系统中,传输的信息包含在信号的某个离散取值中。因此,要求在接收端能正确判决(或检测)发送的是哪一个离散值。至于接收波形的失真,只要她还不足以影响接收端的正确判决,就没有什么关系。这种通信系统的传输质量的度量准则主要是产生错误判决的概率。因此,研究数字通信系统的理论基础主要是统计判决理论。