

随书附赠一张光盘

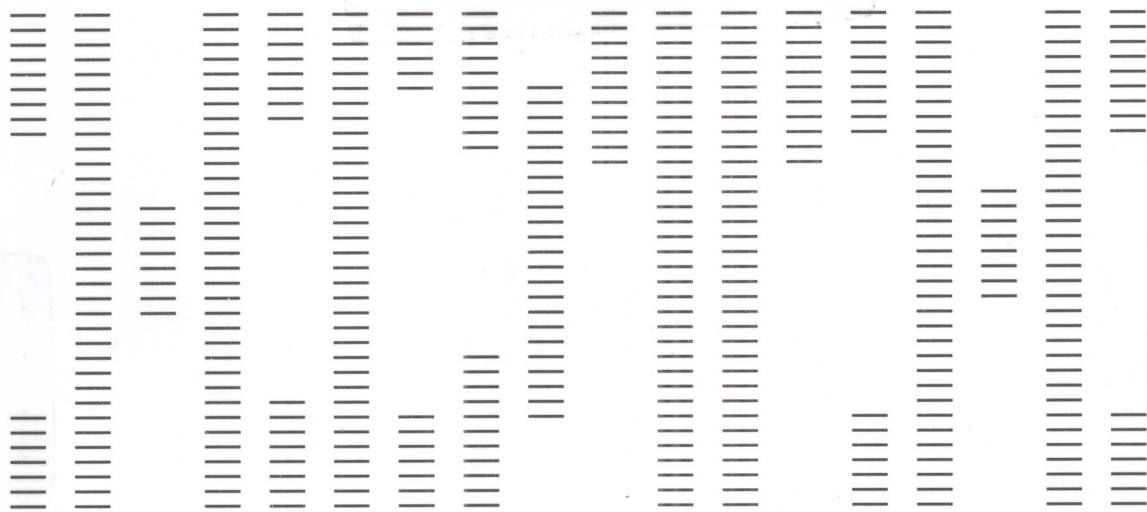


XIANDAI TONGXIN YUANLI YU JISHU

普通高等院校电子信息类“十一五”规划教材

现代通信原理与技术

□ 李永忠 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等院校电子信息类“十一五”规划教材

现代通信原理与技术

李永忠 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

通信原理课程,是通信工程和电子信息等专业的核心专业基础课之一。由于通信原理课程的理论性强,课堂学习又是纯理论的知识,而且实验项目有限,且全部利用硬件实验箱实现,导致学生只能了解部分原理,对完整的通信系统的设计和认识比较模糊。本教材以现代通信系统为背景,突出通信系统的实践环节,每章内容的后面都增加了通信系统原理的Matlab仿真实验和SystemView仿真实验,使学生在在学习过程中用仿真实验可以直观而深入地理解通信系统的基本原理、基本技术和系统性能的分析方法。在硬件实验环境下无法实现的实验内容可以在软件仿真实验中完成。

本书可作为工科通信工程、电子信息、信息工程、通信与电子类专业学生的“通信原理”课程教材和辅助教材,也可作为研究生和相关领域工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代通信原理与技术/李永忠编著. —北京:国防工业出版社,2010.5

普通高等院校电子信息类“十一五”规划教材
ISBN 978-7-118-06563-3

I. ① 现… II. ① 李… III. ① 通信理论-高等学校-教材 ② 通信技术-高等学校-教材 IV. ① TN91

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第009725号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 31½ 字数 1068千字

2010年5月第1版第1次印刷 印数 1—4000册 定价 55.00元(含光盘)

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

“通信原理”是通信工程和电子信息等专业的核心专业基础课之一。由于通信原理课程的理论性强,课堂学习是纯理论的知识,而且实验项目有限,全部利用硬件实验箱实现,导致学生只能了解部分原理,对完整的通信系统的设计和认识比较模糊。本教材以现代通信系统为背景,突出通信系统的实践环节。每章内容的后面都增加了通信系统原理的 Matlab 仿真实验和 SystemView 仿真实验,使学生在在学习过程中用仿真实验可以直观而深入地理解通信系统的基本原理、基本技术和系统性能的分析方法。在硬件实验环境下无法实现的实验内容可以在软件仿真实验中完成。本教材中用 Matlab 和 SystemView 作为仿真平台,将 Matlab 的通信工具箱和 SystemView 的可视化动态仿真技术应用到通信原理课程的实验,使一些抽象的概念和原理可视化,有助于学生的理解和接受,既提高了教学质量和效率,又为学生提供了良好的通信系统的开发、设计、模拟、调试分析平台,锻炼其分析和解决问题的能力。教材内容以樊昌信等编著的经典教材《通信原理》(第 5 版)和罗新民等编著的《现代通信原理》内容为基础,包括模拟通信系统和数字通信系统,并以数字通信系统为主。主要介绍调制、编码、信号设计、噪声分析等基本理论和分析方法。本教材吸收了国内外同类教材的优点,并结合近几年来的教学实践和改革成果编写而成。内容由浅到深,加上仿真实验,为学生的自主学习和研究性学习打下良好基础。

全书共 13 章,包括:绪论、确定信号分析、随机信号和噪声分析、信号设计与信号处理技术、信道与线性调制系统、角度调制系统、信源编码、数字基带传输系统、数字载波传输系统、差错控制编码、同步原理、通信网及现代舰船通信技术。

本书的特点是以现代通信系统为背景,突出通信系统的实践环节,概念准确、内容全面、自成体系、便于自学和仿真实验。既注重基本理论和基本概念 的阐述,又突出通信系统的理论的实现技术,为学生提供通信系统的开发、设计、模拟和调试分析平台,锻炼其分析和解决问题的能力。本书可作为工科信息工程、通信与电子类专业通信原理课程学习的教材或辅助教材,也可作为相关领域工程技术人员的参考书。读者应具备概率论、电路、信号与系统和通信电子线路等方面的知识。

本教材的参考教学时间为 64 学时~90 学时。使用本教材时,可根据不同的教学要求灵活讲授。全书共分 13 章,由李永忠负责编写以及统稿和修改。本教材的仿真实验主要由盛立红、武小凤、李令伟、姜兆刚和朱锋等同学完成。对本书参与编写和提出宝贵意见老师和同学,作者表示诚挚的感谢。

由于编者水平和学识有限,加之时间仓促,书中不妥和错误之处在所难免,殷切地希望广大读者及同行专家批评指正。

编 者

目 录

第1章 绪论	1	2.6 窄带系统及窄带信号分析	38
1.1 通信技术的发展和展望	1	2.6.1 傅里叶反变换法	39
1.2 信息、信息量与信道容量公式	3	2.6.2 解析法——等效低通网络函数法	39
1.2.1 消息、信号与信息	3	2.7 复数信号与时域希尔伯特(Hilbert) 变换	40
1.2.2 信息量	4	2.7.1 复数信号的定义	40
1.2.3 平均信息量	4	2.7.2 复数信号的实部与虚部及希尔伯 特变换	41
1.2.4 香农信道容量公式	6	2.7.3 实时间信号的复指数表示和解析 信号表示	42
1.3 通信系统模型	7	2.7.4 窄带实时间信号自相关函数的 复数化求解	44
1.3.1 通信系统一般模型	7	2.8 计算机仿真的一般方法	45
1.3.2 通信系统分类	9	2.8.1 信号及系统在计算机中的表示	45
1.3.3 模拟通信系统和数字通信系统	10	2.8.2 模拟(连续)信号用(离散)数字 信号处理	48
1.4 通信系统主要性能指标	11	2.8.3 谱分析方法应用	48
1.4.1 有效性	11	习题	50
1.4.2 可靠性	11	第3章 随机信号与噪声	53
1.5 通信仿真工具介绍	12	3.1 随机过程的基本概念	53
1.5.1 Matlab 简介	12	3.2 随机过程的统计描述	54
1.5.2 SimuLink 模块介绍	13	3.2.1 随机过程的分布函数和概率 密度函数	54
1.5.3 SystemView 简介	15	3.2.2 随机过程的数字特征	55
1.5.4 SystemView 仿真步骤	18	3.3 平稳随机过程	57
1.5.5 SystemView 仿真实例	18	3.3.1 平稳随机过程的定义及其含义	57
习题	20	3.3.2 平稳随机过程的一维及二维概率 密度函数	57
第2章 确定信号分析	22	3.3.3 平稳随机过程的数字特征	58
2.1 信号的正交分解及频谱分析	22	3.3.4 平稳随机过程自相关函数的性质	58
2.1.1 信号的正交分解	22	3.3.5 平稳随机过程的各态历经性 (遍历性)	59
2.1.2 信号的频谱分析	23	3.4 平稳随机过程的自相关函数与 功率谱密度的关系	60
2.2 能量信号和功率信号	25	3.5 两个随机过程之间的统计联系	62
2.2.1 能量信号及能量谱密度函数	25	3.5.1 联合分布函数和联合概率 密度函数	62
2.2.2 功率信号及功率谱密度函数	26	3.5.2 互相关函数	62
2.3 相关函数和功率谱密度函数	27		
2.3.1 能量信号的相关函数	27		
2.3.2 能量信号的相关定理	29		
2.3.3 功率信号的相关函数	29		
2.4 傅里叶变换的不足与信号的时—频 分析法	31		
2.4.1 Chirp 信号的时—频表示	32		
2.4.2 傅里叶变换的内积形式	33		
2.5 信号的多分辨率分析	35		

3.5.3 互谱密度函数	63	4.8 超正交单纯码及哈达吗(Hadamard)矩阵	116
3.6 正态随机过程	63	4.8.1 超正交单纯码	116
3.6.1 正态随机过程的定义	63	4.8.2 哈达吗矩阵[H]	118
3.6.2 正态随机过程的性质	64	本章仿真实验举例	120
3.7 平稳随机过程通过线性系统	65	习题	126
3.8 白噪声、散弹噪声和热噪声	67	第5章 信道与线性调制	128
3.9 白色随机过程通过窄带线性系统——窄带噪声	69	5.1 信道	128
3.9.1 窄带噪声的波形特征	70	5.1.1 信道的基本概念	128
3.9.2 $n_c(t)$ 和 $n_s(t)$ 以及 $R(t)$ 和 $\theta(t)$ 的统计特性	71	5.1.2 信道容量	129
3.10 正弦波加窄带高斯噪声的统计特性	74	5.1.3 信道特性	129
本章仿真实验举例	75	5.1.4 编码与调制	132
习题	77	5.2 线性调制	133
第4章 信号设计与信号处理技术	81	5.2.1 标准振幅调制(AM)	134
4.1 信号设计与处理技术概述	81	5.2.2 抑制载波双边带调制(DSB)	138
4.2 信号处理技术	81	5.2.3 单边带调制(SSB)	140
4.2.1 系统和信号带宽	81	5.2.4 残留边带调制(VSB)	142
4.2.2 非线性处理	83	5.3 幅度调制系统的一般模型	144
4.3 信号设计	85	5.3.1 幅度调制信号产生的一般模型	144
4.3.1 信号设计的基本原则	85	5.3.2 SSB调制模型	145
4.3.2 匹配滤波器	86	5.3.3 VSB调制模型	147
4.3.3 输入为非白噪声时匹配滤波器的传输特性	90	5.4 幅度调制信号解调的一般模型	148
4.4 信号单元的相关函数	91	5.4.1 同步解调	148
4.4.1 信号单元	91	5.4.2 包络解调	148
4.4.2 序列信号单元的相关函数	91	5.5 幅度调制系统的抗噪声性能	149
4.5 鸟声信号	93	5.5.1 通信系统抗噪声性能的分析模型	149
4.5.1 鸟声信号的时域表示	93	5.5.2 幅度调制系统同步解调时的抗噪性能	150
4.5.2 鸟声信号的频谱	94	5.5.3 幅度调制系统包络解调时的抗噪性能	153
4.5.3 鸟声信号自相关函数	95	本章仿真实验举例	154
4.6 m 序列信号	96	习题	168
4.6.1 m 序列的产生	96	第6章 模拟角度调制系统(非线性调制)	171
4.6.2 特征多项式与序列多项式	98	6.1 角度调制的基本概念	171
4.6.3 m 序列的产生条件	100	6.1.1 相位调制(PM)	171
4.6.4 m 序列信号的性质	101	6.1.2 频率调制(FM)	172
4.6.5 非线性反馈移位寄存器序列—— M 序列	108	6.2 调频信号频谱分析与卡森(Carson)带宽	173
4.6.6 m 序列的应用	109	6.2.1 窄带调频(NBFM)	174
4.7 巴克(Barker)序列	113	6.2.2 简谐信号(单音)调制时的宽带调频	174
4.7.1 巴克序列及其自相关函数	113	6.2.3 卡森带宽	176
4.7.2 巴克序列的演变	114	6.3 调频信号的产生与解调	177
4.7.3 巴克序列的检测	114		

6.3.1 调频信号的产生	177	7.9 PCM系统与 ΔM 系统的比较	230
6.3.2 调频信号的解调	177	7.10 语音和图像信号的压缩编码	230
6.4 调频系统的抗噪声性能分析	178	7.10.1 语音压缩编码	231
6.4.1 窄带调频系统的抗噪声性能	178	7.10.2 图像压缩编码	232
6.4.2 宽带调频系统的抗噪声性能	180	本章仿真实验举例	235
6.5 预加重和去加重技术对噪声特性 的改善	184	习题	243
6.6 频分复用(FDM)	186	第8章 数字基带传输系统	246
6.7 模拟调制系统的应用实例	187	8.1 数字基带信号	247
本章仿真实验举例	190	8.1.1 数字基带信号的要求	247
习题	195	8.1.2 数字基带信号的波形	247
第7章 信源编码	197	8.1.3 常用的基带传输码型	249
7.1 抽样定理	197	8.2 数字基带信号的功率谱	251
7.1.1 低通信号的抽样定理	197	8.3 无码间串扰传输系统与奈 奎斯特(Nyquist)准则	254
7.1.2 自然抽样	199	8.3.1 基带系统传输特性及码间串扰	254
7.1.3 平顶抽样	200	8.3.2 无码间串扰系统特性	254
7.1.4 带通信号的抽样定理	201	8.3.3 奈奎斯特第一准则(抽样值的 无失真条件)	255
7.2 离散无记忆信源(DMS)编码	202	8.3.4 奈奎斯特第二准则(转换点无 失真条件)	256
7.2.1 等长编码	202	8.3.5 奈奎斯特第三准则(脉冲波形面积 保持不变条件)	257
7.2.2 不等长编码	203	8.3.6 无码间串扰的滚降系统特性	257
7.3 脉冲模拟调制	204	8.4 部分响应系统	259
7.4 脉冲编码调制	205	8.4.1 余弦谱传输特性	259
7.4.1 脉冲编码调制基本原理	205	8.4.2 正弦谱特性	260
7.4.2 均匀量化与量化噪声	205	8.4.3 部分响应系统波形	261
7.4.3 压扩原理及非均匀量化	206	8.4.4 常用部分响应系统举例	262
7.4.4 PCM编码	209	8.5 基带系统的最佳化	264
7.4.5 PCM译码	213	8.5.1 理想信道下的最佳基带系统	264
7.5 PCM信号的时分复用	214	8.5.2 非理想信道下的最佳接收	264
7.5.1 时分复用(TDM)原理	214	8.6 基带系统的抗噪声性能	265
7.5.2 PCM基群帧结构及高次群	215	8.6.1 理想系统的抗噪声性能	266
7.5.3 PCM信号的带宽	216	8.6.2 最佳基带系统的抗噪声性能	267
7.5.4 时分复用(TDM)与频分复用(FDM) 的比较	217	8.7 均衡器原理	268
7.6 PCM系统的抗噪声性能	217	8.7.1 频域均衡	268
7.6.1 量化噪声的影响	217	8.7.2 时域均衡	270
7.6.2 误码对输出信号的影响	218	8.8 数据序列的扰乱与解扰	273
7.7 自适应差分脉冲编码调制 (ADPCM)	219	8.9 眼图	276
7.8 增量编码调制(DM或 ΔM)	220	本章仿真实验举例	277
7.8.1 ΔM 的基本原理	220	习题	282
7.8.2 量化噪声及过载量化噪声	221	第9章 数字载波传输系统	286
7.8.3 增量编码调制系统的抗噪声性能	222	9.1 数字载波传输系统概述	286
7.8.4 增量总和($\Delta - \Sigma$)调制和自适应 数字压扩增量调制	223		

9.2 二进制数字已调信号及其功率谱	287	10.3.3 线性分组码的生成矩阵	348
9.2.1 2ASK 信号	287	10.3.4 线性分组码的伴随式和检错纠错能力	349
9.2.2 2FSK 信号	288	10.3.5 汉明码	351
9.2.3 2PSK 及 2DPSK 信号	291	10.4 循环码	352
9.3 二进制数字调制系统的抗噪声性能分析	294	10.4.1 循环码的循环特性及码多项式	352
9.3.1 2ASK 系统的抗噪声性能	294	10.4.2 循环码的生成多项式及生成矩阵	353
9.3.2 2FSK 系统的抗噪声性能	297	10.4.3 循环码的编码与解码	355
9.3.3 2PSK 及 2DPSK 系统抗噪声性能	300	10.4.4 BCH 码	357
9.4 各种数字调制系统的性能比较	303	10.5 卷积码	359
9.5 多进制数字调制系统	304	10.5.1 卷积码概述	359
9.5.1 多进制幅度键控 (MASK)	304	10.5.2 网格编码调制 (TCM)	364
9.5.2 多进制移频键控 (MFSK)	305	10.5.3 Turbo 码	366
9.5.3 多进制移相键控 (MPSK)	306	本章仿真实验举例	370
9.6 改进型数字调制系统	309	习题	381
9.6.1 正交调幅 QAM (又称幅相键控 APK)	309	第 11 章 同步原理	384
9.6.2 连续相位频移键控 (CPFSK) 及 MSK、TMF 调制	312	11.1 同步的基本概念	384
9.6.3 高斯最小移频键控 (GMSK) 方式	317	11.2 锁相环 (PLL) 的基本工作原理	384
9.7 数字信号的最佳接收	318	11.2.1 模拟锁相环	385
9.7.1 数字信号接收的统计描述	318	11.2.2 数字锁相环	388
9.7.2 确知信号的最佳接收机	319	11.3 载波同步	391
9.7.3 二进制最佳接收机性能分析	322	11.3.1 插入导频法	392
9.8 数字调制系统性能比较	324	11.3.2 直接提取载波法	393
9.9 数字频带传输系统举例	326	11.3.3 载波同步的性能及相位误差对解调信号的影响	396
本章仿真实验举例	327	11.4 码元同步	397
习题	334	11.4.1 插入导频法	397
第 10 章 差错控制编码	336	11.4.2 直接提取位同步法	398
10.1 差错控制编码原理	336	11.4.3 位同步相位误差对性能的影响	399
10.1.1 引起误码的原因及降低误码的常用方法	336	11.5 群同步	400
10.1.2 差错控制编码的基本方法及差错控制方式	337	11.5.1 起止式同步法	400
10.1.3 纠错编码的基本原理	339	11.5.2 连贯插入特殊码字同步法	401
10.1.4 码间距离 d 及检错纠错能力	341	11.5.3 间隔式插入同步码法	402
10.2 常用简单差错控制编码	343	11.5.4 群同步系统的性能	403
10.2.1 奇偶监督码	343	11.5.5 自群同步简介	405
10.2.2 二维奇偶监督码	344	11.6 数字通信网的网同步	405
10.2.3 恒比码	345	11.6.1 主从同步方式	406
10.3 线性分组码	346	11.6.2 相互同步方式	406
10.3.1 线性分组码的概念	346	11.6.3 独立时钟同步方式	407
10.3.2 线性分组码的监督矩阵	346	本章仿真实验举例	408
		习题	410
		第 12 章 通信网	412
		12.1 通信网概述	412

12.1.1 通信网的概念	412	13.7 潜艇通信技术	446
12.1.2 计算机通信网与计算机网络	413	13.7.1 潜艇通信系统	446
12.1.3 通信网的类型	414	13.7.2 HF 通信技术	447
12.1.4 通信网的基本要求	414	13.7.3 软件无线电技术	448
12.1.5 通信网的交换方式	415	13.7.4 光纤通信技术	448
12.1.6 通信网的约定	418	13.8 计算机通信技术在船舶信息	
12.2 通信网的组织与结构	420	方面的应用	448
12.2.1 通信网的通用两级子网结构	420	13.9 计算机通信技术在船舶自动化	
12.2.2 通信网的拓扑结构	421	系统中的应用	449
12.2.3 网络功能的分层体系结构	422	13.10 无线局域网(WLAN)	450
12.2.4 国际标准通信网的网络		13.10.1 IEEE 802.11 协议标准	450
体系结构	423	13.10.2 蓝牙(Bluetooth)	451
12.3 数据通信网	424	13.10.3 家庭网络 HomeRF 与	
12.3.1 数据通信网概述	424	HIPERLAN 协议	452
12.3.2 利用普通公用电话网进行		13.10.4 IrDA	452
数据通信	425	13.10.5 中国 WLAN 规范	452
12.3.3 分组交换网	427	13.10.6 WLAN 特性	453
12.3.4 数字数据网(DDN)	429	13.10.7 WLAN 的关键技术	454
12.4 综合业务数字网(ISDN)简介	431	13.11 超宽带通信(UWB)	456
12.4.1 ISDN 的概念	431	13.12 3G 和 4G	459
12.4.2 ISDN 的网络功能体系结构	432	13.12.1 3G 概念及其标准	459
12.4.3 ISDN 的用户/网络接口	433	13.12.2 三种技术标准的比较	460
习题	434	13.12.3 4G 概念及其通信技术特点	461
第 13 章 现代舰船通信技术	435	13.12.4 4G 的关键技术	461
13.1 引言	435	13.12.5 4G 网络系统的几个技术标准	462
13.2 舰船通信技术发展现状	435	13.13 紫外光通信技术	462
13.3 典型的舰船对外通信系统	435	13.13.1 紫外光通信的特点	463
13.4 舰船通信安全技术	436	13.13.2 紫外光通信国内外研究背景	464
13.4.1 通信反侦察	437	13.13.3 紫外光通信原理	464
13.4.2 通信抗干扰	438	13.13.4 紫外光通信系统的应用	465
13.4.3 通信防摧毁	439	13.14 舰船通信技术发展趋势	467
13.5 ATM 技术	439	附录 通信原理 Matlab 仿真实验	470
13.5.1 ATM 技术的基本原理	439	实验一 信号的傅里叶变换	473
13.5.2 ATM 技术的基本要素	439	实验二 各种信道码性能比较	477
13.5.3 基于 ATM 技术的舰艇通信网	440	实验三 升余弦滚降系统设计	479
13.5.4 ATM 技术在海军舰艇通信		实验四 取样偏差与误码率	481
网中的应用	440	实验五 多径传输	483
13.5.5 ATM 技术面临的问题	441	实验六 BPSK 调制解调仿真	484
13.6 卫星通信技术	441	实验七 QPSK 调制解调仿真	486
13.6.1 卫星通信的特点	442	实验八 16QAM 的仿真	489
13.6.2 卫星通信系统的工作原理	442	参考文献	494
13.6.3 卫星通信系统的组成	443		
13.6.4 通信卫星的组成	445		
13.6.5 卫星的应用	445		

第1章 绪 论

1.1 通信技术的发展和展望

随着数字通信技术和计算机技术的快速发展以及通信网与计算机网络的相互融合,信息科学技术已成为21世纪国际社会和世界经济发展和新的强大推动力。信息作为一种资源,只有通过广泛地传播与交流才能产生利用价值,促进社会成员之间的合作,推动社会生产力的发展,创造出巨大的经济效益。因此,通信的根本目的在于传输含有信息的信息。“通信”也就是“信息传输”或“消息传输”。目前的通信越来越依赖于利用“电”来传递消息的电通信方式。由于电通信迅速、准确、可靠且不受时间、地点、距离的限制,因而得到了迅速的发展和广泛的应用。如今,在自然科学领域涉及“通信”这一术语时,一般是指“电通信”。

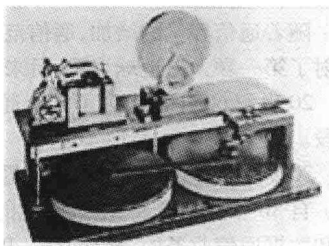
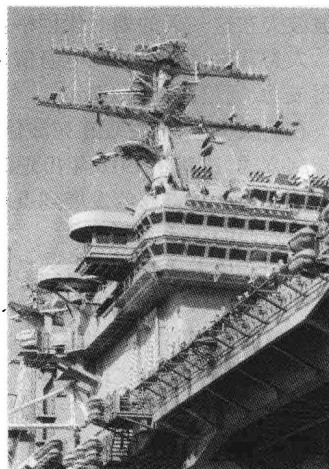
物质、能量和信息是构成社会的三大基本要素。当前,人类社会已步入了“信息社会”,一场信息化革命的风暴正席卷全球。这是人类社会继农业革命、工业革命之后的又一次改变人类社会进程的伟大革命。在信息社会,人们无需再像以前那样将主要的时间和精力用于物质、能源的开发和利用上,而是以更多的精力与信息打交道。信息社会的最主要特征是,信息已成为一种重要的社会资源。信息社会与工业社会、农业社会的最大差异在于信息已成为人类生存及社会进步的重要推动力。信息的开发和利用已成为社会生产力发展的重要标志。现代通信系统起着信息传输和交换的作用,在信息社会中更显示出它的重要性,通信系统可视为信息社会的生命线。通信技术的发展代表着人类社会的文明和进步,因此,从事通信方面的技术人员应该了解通信技术的过去和现在,预测未来的发展。

自人类存在以来,在生存斗争中总要进行交流思想和传递消息。远古时代的人类用表情和动作进行信息交换,这是人类最原始的通信。在漫长的生活斗争中,人类创造了语言和文字,进而用语言和文字(书信)进行消息的传递。在电信号出现之前,人们还创造了许多消息的传递方式:如古代的烽火狼烟、击鼓鸣金、摇旗呐喊、飞鸽传信,航行用的信号灯等。这些方式,可以在较远的距离之间及时地完成消息的传递。这些通信方法和手段只能极其有限地解决一定距离的通信问题。现代电信通信技术(电话、电视、广播、互联网等)从根本上解决了长距离的通信问题。目前,这些现代通信方法和手段已为人们所熟知,并成为社会生活中一个不可或缺的组成部分。随着科学技术与社会的发展,对通信的要求也越来越高。

近代探空通信的一个成功范例是美国航天局2005年1月12日发射了用来探测彗星的“深度撞击”号探测器,它的目标是“坦普尔一号”彗星的彗核。“深度撞击”发射了一发“炮弹”于7月4日与“坦普尔一号”彗星在距地球1.32亿千米处相撞,并将观测到的宝贵图像和数据传回地球(延时大约74min)。

最复杂的通信系统是海上舰船通信,包括对空通信、卫星通信、编队通信、对岸通信、对潜通信(水声)、通信侦察、通信对抗、内部通信(语音、数据、图像)、甲板语音通信等。

自从1800年伏特(Volta)发明电源以来,人们就试图用电技术进行通信。经过几代人不断的努力和开发,通信技术得到了飞速发展。按照人类交流方式与技术的不同,可以把通信历史划分以下几个阶段:第一阶段是语言阶段;第二阶段是文字、邮政阶段;第三阶段是印刷术、出版物阶段;第四阶段是电报、电话、广播阶段;第五阶段是通信与计算机的结合、计算机



网络通信阶段。

最早的电通信设想是1753年2月17日,《苏格兰人》杂志上发表了一封署名C. M.的书信。在这封信中,作者提出了用电流进行通信的大胆设想。他建议:把一组金属线从一个地点延伸到另一个地点,每根金属线与一个字母相对应。在一端发报时,便根据报文内容将一条条金属线与静电机相连接,使它们依次通过电流。电流通过金属线上的小球便将挂在它下面的写有不同字母或数字的小纸片吸了起来,从而起到远距离传递信息的作用。

最早的有线电报是1844年5月24日,莫尔斯从华盛顿到巴尔的摩拍发人类历史上的第一份电报。在座无虚席的国会大厦里,莫尔斯用激动得有些颤抖的双手,操纵着他倾十余年心血研制成功的电报机,发出了:“上帝创造了何等奇迹!”一语。这种通信方式利用导线中电流的有、无来代表传号和空号,并利用传号和空号的长短编码来传递信息。电报的发明为人类利用电技术进行通信的历史揭开了第一页。

最早的有线电话是1875年6月2日,美国人亚力山大·格雷厄姆·贝尔(Alekander Graham. Bell)发明了电话。至今美国波士顿法院路109号的门口,仍钉着块刻有:“1875年6月2日电话诞生在这里”的铜牌。1876年2月14日,贝尔申请了著名的电话专利。同一天另一个发明家格雷(1835—1901)也向美国专利局递交了相似设备的专利申请,只因比贝尔晚了几个小时而痛失电话发明权。由于电话直接利用导线上电流的强弱来传送语音信号,因而使通信技术的发展又进了一大步,这种通信方式一直保留到现在。但这种有线通信系统要花费很大的代价建造线路,甚至在有些情况下是难以实现的。

1864年麦克斯韦(Maxwell)预言了电磁波辐射的存在,1887年3月21日,德国物理学家赫兹(Hertz)通过实验证实了这一预言,这为现代无线电通信技术提供了理论根据。在实验中发现,电火花的能量能够越过空间传到远处,这是人类历史上第一次证实了电磁波的存在。无线电波可以在大气媒质中传播,不需要价格昂贵的线路投资。因而这一理论的创立大大推动了无线电通信技术的发展。但赫兹断然否认利用电磁波进行通信的可能性。他认为如要利用电磁波进行通信的话,需要有一面面积与欧洲大陆相当的巨型反射镜。

最早的无线通信是1895年5月7日,36岁的波波夫在彼得堡的俄国物理化学会的物理分会上,宣读了关于“金属屑与电振荡的关系”的论文,并当众展示了他发明的无线电接收机。当他的助手在大厅的另一端接通火花式电波发生器时,波波夫的无线电接收机便响起铃声,断开电波发生器,铃声立即中止。几十年后,为了纪念波波夫在这一天的划时代创举,当时的苏联政府便把5月7日定为“无线电发明日”。

人类首次远距离无线电通信是1897年5月18日,马可尼进行横跨布里斯托尔(Bristol)海峡的无线电通信取得成功,通信距离为14km。

在实践中,人们发现正弦波信号易于产生和控制,所以在20世纪初期就出现了用高频正弦波作载波的振幅调制方式,这就是1918年出现的调幅(AM)方式。AM通信方式的出现,掀开了通信技术发展的新篇章。AM通信方式使点对点通信发展到点对面的通信(如广播),它促进了人类社会文化交流、宣传教育的发展,深刻地影响着人们的生活。

采用调幅方式传送信号容易受到噪声干扰,使信号失真,影响通信质量。为了提高抗干扰能力,1936年人们发明了调频(FM)技术,FM技术不仅提高了通信系统的抗干扰能力,而且大大推动了移动通信技术的发展。AM和FM方式的应用标志着模拟通信时代的到来。

数字通信不仅能实现人与人、人与机器、机器与机器之间的通信和数据交换功能,而且具有比模拟通信系统更好的性能。1928年奈奎斯特(Nyquist)提出了著名的抽样定理,1937年瑞维斯(A. H. Reeves)发明了PCM(脉冲编码调制)通信技术,这些都为数字通信系统的发展奠定了坚实的理论基础。但由于器件的限制,数字通信技术当时并未实现,直到晶体管出现后,1950年贝尔实验室才生产出了第一台实用的PCM数字通信设备。

随着通信容量的增加,通信范围的扩大,1955年皮尔斯(J. R. Pierce)提出了卫星通信的设想。1957年人类发射了第一颗人造地球卫星,后来发射了同步通信卫星,为国际间大容量通信奠定了基础。

20世纪60年代出现了光纤通信,光纤通信容量大,可靠性高。目前我国的光纤通信正处在推广和应用阶段。

20世纪70年代出现的计算机通信网络,使数据通信得到迅速发展,今天,互联网已遍布了全球的每个角落。自80年代初开始,全数字化的综合业务数字网(ISDN)就成为通信界关注的焦点,ISDN是一个服务于语音和数据通信业务的综合网络。1980年发达国家就开通了ISDN实验网,1984年原CCITT(国际电话电报咨询

委员会)就提出了 ISDN 的功能、网络结构、接口及网络互连等方面的一系列建议,以后 ISDN 技术得到了迅速地发展。

90 年代,通信网络和信息化基础建设得到极大地发展,新的通信技术不断涌现,如同步数字序列(SDH)、异步传输模式(ATM)、第三代移动通信技术(3G)和 IP 网络等。预计到 21 世纪中期,人类将进入通信的理想境界——个人通信(PCN)时代。个人通信是指任何人(Whoever)能在任何时间(Whenever)、任何地点(Wherever),以任何方式(Whatever)与任何他人(Whomever)进行所谓的“5W”通信的理想方式。

1933 年,中国电报通信首次使用打字电报机。1950 年 12 月 12 日,我国第一条有线国际电话电路——北京至莫斯科的电话电路开通。经由苏联转接通往东欧各国的国际电话电路也陆续开通。1958 年,上海试制成功第一部纵横制自动电话交换机,第一套国产明线 12 路载波电话机研制成功。1970 年,我国第一颗人造地球卫星(东方红 1 号)发射成功。1984 年 5 月 1 日,广州用 150MHz 频段开通了我国第一个数字寻呼系统。程控中文电报译码机通过鉴定并推广使用。首次具备国际直拨功能的编码纵横制自动电话交换机(HJ09 型)研制成功。1987 年 11 月,广州开通了我国第一个移动电话局,首批用户有 700 个。1993 年 9 月 19 日,我国第一个数字移动电话通信网在浙江省嘉兴市首先开通。1998 年 5 月 15 日,北京电信长城 CDMA 网商用试验网——133 网,在北京、上海、广州、西安投入试验。

纵观通信技术的发展历程可以看出,通信技术经历了点到点的通信,再到多点之间的信息传输和交换,最后进入网络时代的发展过程。通信技术来源于社会经济需求,反过来通信技术的发展又推动了社会的进步。同时还应当注意到,通信技术的发展离不开通信理论的指导。新的通信理论的出现,必然会带来通信技术的飞跃。当然,新技术的出现也将推动理论的进一步发展。

1.2 信息、信息量与信道容量公式

1.2.1 消息、信号与信息

关于信息的定义,众说纷纭。哲学家说,信息就是认识论;数学家则认为信息是概率论;物理学家把信息定义为熵;通信专家把信息看做是消除不确定性。这表明信息科学尚未形成一套统一的、完整的、得到公认的理论。可以说获取信息的过程是一个由未知到已知的过程(哲学),或者说由不确定到确定的过程(通信)。因此,信息可以看做是消除不确定性。信息分析与统计的工具是概率论(数学)。具有实际意义的平均信息量称为熵(物理)。通信系统传输的具体对象是消息,其终极目的在于通过消息的传递使受信者获知信息。信息指受信者在收到消息前对消息的不确定性。消息是具体的,信息是抽象的。信息包含于消息之中,消息则不一定就是信息。不同的消息含有不同数量的信息,同一消息对不同的接受对象信息来说信息的多少也不同。在数据通信中,消息也称报文,或者称为数据。

消息是通信系统传输的对象。信源产生的消息,要转换为一定形式的信号,经过传输媒介(信道)传送到接收端,接收者才能获得一定的信息。

消息由信源产生,它具有各种不同的形式和内容,如气象中的温度、天气的变化,电话和广播中的语音、电视中的图像画面、电报中的文字及计算机的数据等,都是消息。可以看出,消息是对事件的物理状态变化进行描述的一种具体形式,这种状态变化具有人们能感知的物理特性。虽然消息的物理特征不同,但可概括为两大类:一类为模拟消息,如电话中的语音和电视中的画面,它们是随时间连续变化的,因而又称为连续消息;另一类为数字消息,表现为数字脉冲或字符序列,如电报中的文字,计算机输出的数据等,这种消息又称为离散消息。不管连续消息还是离散消息,它们都具有一个共同特点,即消息随时间在随机地变化。消息不能直接传输,为了传输消息,首先应把待传送的消息,通过不同的传感器转换为电压或电流信号,再通过信道将信号传送到通信系统中的另一方。因而信号是由消息转换来的,可以被传输和处理的具体形式,是消息的运载工具。由消息转换成的信号唯一地对应着消息的变化。由于消息有模拟消息和数字消息,所以信号同样有模拟信号和数字信号。信号随着消息变化。消息或信号的随机变化,人们无法预测,这种“不可预测”的变化,就是“待知”的消息的本质内容,即消息所含的信息。

信息就是消息或信号随机变化中的“不确定性”,是消息中所含的待知的本质内容。信息是一个含义广泛、抽象的概念。各种随机变化的消息都会有一定量的信息,如社会科学中的经济信息、生活信息,科研中的地

震信息、气象信息等。

1.2.2 信息量

消息中包含的信息的大小用信息量来度量。消息中所含的信息量大小与消息发生的概率有密切关系。从直观上来说,一件事发生的概率越小,越使人们感到意外和惊奇,则这件事包含的信息量就越大。例如,如果有两条消息说:“今年的应届本科毕业生找工作比去年更难一些”及“今年的应届本科毕业生可以自愿攻读硕士学位,不需统考”,则后一条消息给大家带来的信息量更大些,因为这件事出现的概率很小。若消息出现的概率接近零,则此消息含有的信息量就趋于无穷大。当一个消息发生的概率为1时,即为必然的事件,则消息所含的信息量为零。由以上分析可以看出,消息中包含的信息量与消息出现的概率的倒数成比例。此外,同时获得多个消息时,得到的信息量应该是每条消息包含的信息量之和。

信息论中定义消息包含的信息量为消息出现概率的倒数的对数,即

$$I = \log_a \left(\frac{1}{P} \right) = -\log_a P \quad (1.1)$$

式中: I 为消息包含的信息量; P 为消息出现的概率; a 为对数的底, a 取值不同,信息量的单位不同。当 a 为2时,信息量的单位为比特(bit);当 a 为10,单位为哈特莱(Hartley);当 a 为 e 时,单位为奈特(nat)。一般情况下,都以比特为信息量的单位,即取 $a=2$ 。

例如,当消息出现的概率为 $P=1/2$ 时,则此消息包含的信息量为1bit。若有 M 个独立等概率出现的消息,每个消息出现的概率为 $1/M$,则消息的信息量为

$$I = \log_2 \left(\frac{1}{P} \right) = -\log_2 1/M = \log_2 M(\text{bit}) \quad (1.2)$$

从工程的角度,也可以对信息量进行定义。信息量就是用传输消息时所需的最少二进制脉冲的数目来衡量消息中包含的信息量大小。因此,信息量在工程上的定义是指传输该消息时所需的最少的二进制脉冲数。当有两个互相独立且等概率出现的消息要传输时,要区别这两种消息,最少需要1位二进制脉冲,因此该消息出现带来的信息量为1bit。若要传输4个独立等概率的消息之一,则至少需2位二进制脉冲,因此,消息具有两个比特的信息量。若有 M 个独立等概率的消息要传送,且满足 $M=2^k(k=1,2,3,\dots)$ 时,此消息可用 k 个二进制脉冲传递,即此消息包含的信息量为 k bit。实际上,该消息的信息量为

$$I = \log_2 M = \log_2 2^k = k(\text{bit})$$

可以看出,工程上定义的信息量与直观定义的信息量是一致的。

信息量满足相加性的条件:如果收到的不是一个而是若干个互相独立的消息,则总的信息量应该是每个消息的信息量之和,即

$$I = - \sum_{i=1}^m n_i \log_a p(x_i) \quad (1.3)$$

式中: n_i 为第 i 种符号出现的次数; $p(x_i)$ 为第 i 种符号出现的概率; m 为消息中符号的种类数。

对于由有限个符号组成的离散信源来说,随着消息长度的增加,其可能出现的不同消息数目按指数增加。由抽样定理知,一个频带有限的连续信号,可用每秒一定数目的离散抽样脉冲值代替。这些离散的脉冲抽样值,可用二进制的脉冲序列表示。可见,以上给出的信息量定义,同样也适用于连续消息。

1.2.3 平均信息量

一般来说,信源可以产生多个独立的消息(或符号),每个消息发生的概率可能并不相等,所以每个消息的信息量也不相同。这种情况下,通常考虑每个消息(或符号)所含信息量的统计平均值,称为信源的平均信息量。

信源的平均信息量的计算是由每个消息的信息量按概率加权求和得到的。如一个信源由 A 、 B 、 C 三种符号组成,出现 A 的概率为 $P(A)$;出现 B 的概率为 $P(B)$;出现 C 的概率为 $P(C)$,则信源的平均信息量为

$$\bar{I} = - [P(A) \log_2 P(A) + P(B) \log_2 P(B) + P(C) \log_2 P(C)] \quad (1.4)$$

更一般地说,在由 n 个独立的符号 x_1, x_2, \dots, x_n 所构成的信源中,每个符号出现的概率分别为 $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_n)$,且 $\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$,则此信源的平均信息量为

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (\text{比特/符号}) \quad (1.5)$$

式中: $H(x)$ 为信源的平均信息量。由于 $H(x)$ 的定义与统计热力学中熵的定义相似, 所以称 $H(x)$ 为信源的熵 (Entropy), 其单位为比特/符号。

例 1.1 一消息由 0、1、2、3 四种符号组成, 各符号出现概率分别为 $3/8, 1/4, 1/4$ 和 $1/8$ 。消息总长 57 个符号, 其中 0 出现 23 次, 1 出现 14 次, 2 出现 13 次, 3 出现 7 次。求该消息的总信息量。

解 解法一: 利用信息量叠加计算

$$\begin{aligned} I &= - \sum_{i=1}^4 n_i \log_2 P_i = -23 \log_2 \frac{3}{8} - 14 \log_2 \frac{1}{4} - 13 \log_2 \frac{1}{4} - 7 \log_2 \frac{1}{8} \\ &= 32.55 + 28 + 26 + 21 = 108.55 \text{ bit} \end{aligned}$$

解法二: 利用平均信息量计算

$$\begin{aligned} I &= H(x) \cdot N = - \sum_{i=1}^4 P(x_i) \log_2 P(x_i) \cdot N \\ &= \left(-\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} \right) \times 57 \\ &= 1.9056 \times 57 = 108.62 \text{ bit} \end{aligned}$$

由此可见, 两种方法计算的信息量相差很小, 消息的符号越多其误差也越小。

例 1.2 某信源的符号集由 A、B、C、D 和 E 组成, 设每一个符号独立出现, 出现的概率分别为 $1/4, 1/8, 1/8, 3/16$ 和 $5/16$ 。试求该信源的平均信息量。

解 信源的平均信息量, 即为信源的熵, 由式 (1.5), 得

$$\begin{aligned} H(x) &= - \sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \\ &= - \left[\frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} + \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} + \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} + \frac{3}{16} \log_2 \frac{3}{16} + \frac{5}{16} \log_2 \frac{5}{16} \right] \\ &= 2.23 \text{ 比特/符号} \end{aligned}$$

如果信源中各符号的出现是统计相关的, 则式 (1.5) 就不再适用, 这时必须用条件概率来计算信源的平均信息量。如果只考虑前后相邻的两个符号的统计相关特性, 则前一个符号为 x_i , 后一个符号为 x_j 的条件平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x_j/x_i) &= \sum_{i=1}^n P(x_i) \sum_{j=1}^n [-P(x_j/x_i) \log_2 P(x_j/x_i)] \\ &= - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [P(x_i) P(x_j/x_i) \log_2 P(x_j/x_i)] \end{aligned} \quad (1.6)$$

式中: $H(x_j/x_i)$ 为信源条件平均信息量; $P(x_j/x_i)$ 为前一个符号为 x_i , 后一个符号为 x_j 的条件概率。条件平均信息量也称为条件信源熵。

例 1.3 某离散信源由 A、B 两种符号组成, 其转移概率矩阵为

$$\begin{bmatrix} P(A/A) & P(A/B) \\ P(B/A) & P(B/B) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 \\ 0.2 & 0.9 \end{bmatrix}$$

且已知 $P(A) = 1/4, P(B) = 3/4$ 。试求该信源的平均信息量。

解 由式 (1.6), 可得该信源的条件平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x_j/x_i) &= - \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 [P(x_i) P(x_j/x_i) \log_2 P(x_j/x_i)] \\ &= - P(A) [P(A/A) \log_2 P(A/A) + P(B/A) \log_2 P(B/A)] \\ &\quad - P(B) [P(A/B) \log_2 P(A/B) + P(B/B) \log_2 P(B/B)] \\ &= 0.532 \text{ 比特/符号} \end{aligned}$$

当 A、B 两个符号独立出现时, 信源的平均信息量为

$$H(x) = - \sum_{i=1}^2 P(x_i) \log_2 P(x_i) = - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{3}{4} \log_2 \frac{3}{4} = 0.81 \text{ 比特/符号}$$

这一结果说明,符号间统计独立时的信源熵大于符号间统计相关时的信源熵。也就是说,符号间的统计相关性将使信源的平均信息量减小。

由式(1.5)可以看出,若信源中各符号的出现是独立并且等概率时,即每个符号独立出现,出现概率为 $P=1/n$,则这时 $H(x)$ 将具有最大值,为

$$H(x) = - \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} \log_2 \frac{1}{n} = \log_2 n \quad (1.7)$$

这个结论的理解是,当各符号等概率出现时,哪一个符号发生是最难预测的,即不确定性最大,所以平均信息量也最大。

以上分析的是产生离散的、相互独立的离散信源消息的平均信息量定义和计算方法。对连续信源的平均信息量,可采用概率密度函数的加权积分来计算。若连续消息出现的概率密度为 $f(x)$,则定义连续消息的相对熵(平均信息量)为

$$H(x) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \ln f(x) dx \quad (1.8)$$

限于篇幅,这里不再详细讨论。

1.2.4 香农信道容量公式

信源的信息通过信道传递到接收端。在给定的信道条件下,信道传递信息的能力有多大呢?为了说明这个问题,信息论中定义了信道容量的概念。信道容量是指信道所能传输的最大信息速率,即

$$C = \max R \quad (1.9)$$

式中: C 为信道容量; R 为信息传输速率。

在离散信道中,信源发出的离散消息(符号)通过信道传送到接收端。信道中的信息传输速率与信源的平均信息量、符号发送的速率以及信道中的干扰有关。由于信道中存在干扰,传递的信息会丢失,接收到的信息量会减少。

在无干扰信道中,信道会无丢失地传递信源所发出的所有信息。此时,信道的信息传输速率为

$$R = rH(x) \quad (1.10)$$

式中: $H(x)$ 为信源的平均信息量; r 为信源每秒发送的符号个数。

若信道中存在干扰,即有扰信道,这时接收端收到的每个符号的平均信息量应是信源的平均信息量减去信道传送中所丢失的信息量,即

$$H_R(x) = H(x) - H(x/y) \quad (1.11)$$

式中: $H_R(x)$ 为接收到一个符号的平均信息量; $H(x)$ 为信源发送每个符号的平均信息量; $H(x/y)$ 为发送一个符号时,在有干扰信道中丢失的平均信息量。

若信道传送符号的速率为 r (符号/秒),则有扰信道中的信息传输速率为

$$R = r[H(x) - H(x/y)] \quad (1.12)$$

式中: $H(x/y)$ 与信道的统计特性有关。

根据信道容量的定义,离散信道的信道容量应为

$$C = \max R = \max \{r[H(x) - H(x/y)]\} \quad (1.13)$$

对于连续信道来说,假设信道中存在加性高斯白色噪声(Additive White Gaussian Noise, AWGN),噪声功率为 $N(W)$,信道的带宽为 B (Hz),信号的平均功率为 $S(W)$,则信道容量为

$$C = B \cdot \log_2 (1 + S/N) \quad (1.14)$$

这就是著名的香农(Shannon)公式。

在此不打算严格证明香农公式,仅从工程的角度说明公式的意义和正确性。在有扰连续信道中,每传送一个符号,需要一定幅度的脉冲。如果传送 M 种符号,则需用 M 种不同幅值的脉冲。若符号出现是等概率的,则传送每种幅值的脉冲代表着传送了 $\log_2 M$ bit 的信息量。为了提高传送脉冲的信息量,希望增加 M 。但在传输信号功率受限的情况下, M 的增大会使各脉冲取值之间的量化分层间隔减小。当脉冲之间的间隔小到一定程度时,由于信道中噪声的干扰,接收端将难以分辨出发送的到底是哪一种幅度的脉冲,从而无法获得信息。若

信道中白色噪声的功率为 NW , 则噪声的均方根电压值为 \sqrt{N} (设负载为 1Ω)。为使脉冲的幅度分层数 (或量化取值数) 最多且能使接收端可分辨, 则脉冲取值的最小间隔应大于或等于噪声的均方根电压值 \sqrt{N} 。若信号的平均功率为 SW , 则接收端的总功率为 $S+N$, 这时接收端信号的最大分层数为

$$M = \sqrt{S+N} / \sqrt{N} = (1+S/N)^{\frac{1}{2}} \quad (1.15)$$

设每种幅值出现的概率相等, 则每种幅值的出现带来的信息量为

$$H(x) = \log_2 M = \log_2 (1+S/N)^{\frac{1}{2}} \quad (1.16)$$

当信道带宽为 B 时, 可以证明, 信道中每秒最多可传送 $2B$ 个脉冲, 即脉冲传输的最高速率 $r_{\max} = 2B$ 。根据式(1.9)及式(1.10), 则连续信道的信道容量为

$$C = 2B \cdot \log_2 (1+S/N)^{\frac{1}{2}} = B \cdot \log_2 (1+S/N) \quad (1.17)$$

式中: S/N 为信道中的信噪比; $N = n_0 B$; n_0 为噪声的单边功率谱密度。

由上式看到, 信道容量取决于 3 个要素, 即带宽 B 、信号功率 S 及噪声的功率谱密度 n_0 (W/Hz)。

由式(1.17)可见, 当增加信道带宽 B 、增加信号功率 S 或减小噪声功率 N 时, 可使信道容量增大。但 S 不可能无限增加, 在有扰信道中, 由于噪声的功率谱密度 n_0 不等于零, 因此可适当调节带宽来增加信道容量。但是, 应当注意到, 随着带宽 B 的增加, 会使噪声功率 $N = n_0 B$ 增加, 从而使信道的容量减少。可以证明, 带宽增大时, 信道容量趋近于某一极限值。由式(1.17), 有

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \lim_{B \rightarrow \infty} B \cdot \frac{n_0}{S} \cdot \frac{S}{n_0} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) = \lim_{B \rightarrow \infty} \frac{n_0 B}{S} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{n_0 B} \right) \cdot \frac{S}{n_0} \quad (1.18)$$

利用公式:
$$\lim_{x \rightarrow \infty} x \log_2 \left(1 + \frac{1}{x} \right) = \log_2 e = 1.44$$

则式(1.18)变为

$$\lim_{B \rightarrow \infty} C = \lim_{B \rightarrow \infty} \frac{S}{n_0} \log_2 e = 1.44 \frac{S}{n_0} \quad (1.19)$$

式(1.19)表明, 在 S/n_0 一定时, 信道带宽虽取无限大值, 但信道容量仍是有限的。这是因为 $B \rightarrow \infty$ 时, $N = n_0 B$ 也趋于无穷大。

香农公式在通信原理中是一个极其重要而有用的公式, 它把通信系统追求的有效性和可靠性两大重要指标结合了起来, 使之既可以互相制约, 又可以互相转换。香农公式对通信系统的设计和新的通信技术的出现有着重要的理论指导意义。

例 1.4 设一幅彩色图片由 3×10^6 个像素组成, 每个像素有 16 个亮度等级, 并假设每个亮度等级等概率出现。现将该幅彩色图片在一信噪比为 30dB 的信道中传输, 要求 3min 传完, 试计算所需的信道带宽。

解 由于每个像素等概率出现 16 个亮度等级, 故每个像素包含的信息量为 $\log_2 16 = 4\text{bit}$ 。

一幅彩色图片包含的总信息量为

$$I = 3 \times 10^6 \times \log_2 16 = 1.2 \times 10^7 \text{ bit}$$

要求 3min 传完该图片, 故信道的信息传输速率为

$$R = (1.2 \times 10^7) / (3 \times 60) \approx 6.67 \times 10^4 \text{ 比特/符号}$$

因为信息传输速率 R 必须小于或等于信道容量 C , 取 $C = R = 6.67 \times 10^4$ 比特/符号。又知信道中的信噪比为 30dB, 即 $S/N = 1000$, 所以由式(1.17)得到所需的信道带宽为

$$B = C / \log_2 (1+S/N) = (6.67 \times 10^4) / \log_2 (1+1000) \approx 6.67 \times 10^3 \text{ Hz}$$

1.3 通信系统模型

1.3.1 通信系统一般模型

通信的目的是传递消息, 或者说传递信息。由于消息存在着许多不同的类型, 以及传输的方法不同, 产生了种类繁多的通信系统。为了分析信息传输的实质, 把各类通信系统共性的及基本的组成概括为一个一般模型。

不管何种通信系统,信息总是由发送端,通过信道,传递到接收端的。因此,通信系统的一般模型如图 1.1 所示。

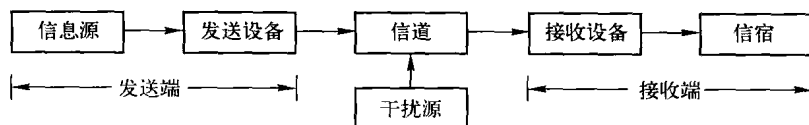


图 1.1 通信系统一般模型

在该通信系统模型中,包括 5 个主要组成部分,即信息源、发送设备、信道、接收设备和信宿。

(1) 信息源:简称信源,是发出消息的人或设备,它把原始的消息转换为电信号。信源的原始消息有各种类型,如语音、图像、数据、文字、图片等。有模拟消息,也有数字消息,有低速率的,也有高速率的。这些消息一般要经过感受转发器变为可传送的电信号。由信源产生的原始信号通常具有较低的频谱分量,称这种信号为基带信号。

(2) 发送设备:把信源输出的电信号转换为适合于信道传输的信号形式。如对电话信号来说,既可直接沿导线传输,也可将其调制到高频载波上,通过无线方式在自由空间中传输,这种转换都由发送设备完成。发送设备包括编码、调制及电平转换等部件。由发送设备输出的信号进入信道进行传输。

(3) 信道:信道是指传输信号的媒质。媒质可以是有线的,也可以是无线的。有线的媒质有双绞线、电缆、波导、光纤等。无线的媒质包括各个频段的电磁波,如:长波、中波、短波、微波及光波等。表 1.1 中列出了常用的无线电波的波段划分及主要的应用情况。信号在信道的传输过程中,不可避免地会受到噪声的干扰。信道的特性和干扰是影响信号传输质量的关键因素之一。

(4) 接收设备:信号经过信道的传输到达接收端,接收设备的作用是发送设备的逆变换。它包括解调器、解码器等,它把接收的信号恢复为原始的信号,送到信宿。

(5) 信宿:信宿是信息到达的目的地,信息通过接收终端把信号还原为原始的消息,或执行某个动作,或进行显示。

由于信源和信宿位于通信系统的两个端头,故又称为终端设备。

表 1.1 通信频段划分及应用

频率范围	符号	名称	波长	应用
30Hz ~ 300Hz	ELF	特低频	$10^4 \text{ km} \sim 10^3 \text{ km}$	海底通信、电报
0.3kHz ~ 3kHz	VF	音频	$10^3 \text{ km} \sim 10^2 \text{ km}$	数据终端、有线通信
3kHz ~ 30kHz	VLF	甚低频	$10^2 \text{ km} \sim 10 \text{ km}$	导航、电话、电报、时标
30kHz ~ 300kHz	LF	低频	$10 \text{ km} \sim 1 \text{ km}$	导航、电力线通信、信标
0.3MHz ~ 3MHz	MF	中频	$10^3 \text{ m} \sim 10^2 \text{ m}$	广播、业余无线电、移动通信
3MHz ~ 30MHz	HF	高频	$10^2 \text{ m} \sim 10 \text{ m}$	国际定点通信、军用通信、广播、业余无线电
30MHz ~ 300MHz	VHF	甚高频	$10 \text{ m} \sim 1 \text{ m}$	电视、调频广播、移动通信、导航、空中管制
0.3GHz ~ 3GHz	UHF	特高频	$10^2 \text{ cm} \sim 10 \text{ cm}$	电视、雷达、遥控遥测、点对点通信、移动通信
3GHz ~ 30GHz	SHF	超高频	$10 \text{ cm} \sim 1 \text{ cm}$	卫星和空间通信、微波接力、雷达
30GHz ~ 300GHz	EHF	极高频	$10 \text{ mm} \sim 1 \text{ mm}$	射电天文、雷达、微波接力
$10^5 \text{ GHz} \sim 10^7 \text{ GHz}$		紫外、红外、可见光	$3 \times 10^{-3} \text{ mm} \sim 3 \times 10^{-5} \text{ mm}$	光通信

另外还有一种不同类型的通信系统,如雷达、声纳及地震勘探等测量系统,此类系统的模型如图 1.2 所示。

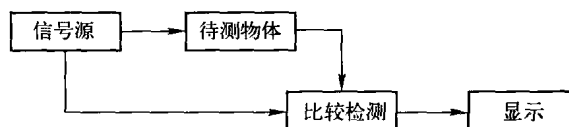


图 1.2 测量系统模型