



高等学校本科规划教材

现代通信原理、技术与仿真

李永忠 徐静 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪高等学校本科规划教材

现代通信原理、技术与仿真

李永忠 徐 静 编著

西安电子科技大学出版社



本书主要介绍通信系统的调制、编码、信号设计、噪声分析等基本理论和分析方法。全书共 13 章, 内容包括绪论、确定信号分析、随机信号与噪声、信道与线性调制、模拟角度调制系统、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、正交编码与伪随机序列、同步原理、通信网、现代通信新技术等。

本书可作为通信工程、电子信息、信息工程等电子类专业本科生“通信原理”课程的教材或辅助教材, 也可作为研究生和相关领域工程技术人员的参考书。

★ 本书配有电子教案, 需要者可登录出版社网站, 免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

现代通信原理、技术与仿真/李永忠, 徐静编著. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.6

面向 21 世纪高等学校本科规划教材

ISBN 978-7-5606-2401-3

I. 现… II. ①李… ②徐… III. ①通信理论—高等学校—教材 ②通信技术—高等学校—教材
③通信系统—系统仿真—高等学校—教材 IV. TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 017365 号

策 划 云立实

责任编辑 许青青 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 31.25

字 数 745 千字

印 数 1~3000 册

定 价 44.00 元

ISBN 978-7-5606-2401-3/TN·0556

XDUP 2693001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

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，课堂学习的是纯理论的知识，而且实验项目有限，全部利用硬件实验箱实现，因此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。本书以现代通信系统为背景，突出通信系统的实践环节，各章内容都增加了 MATLAB 和 SystemView 的仿真实验，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。本书是吸收了国内外同类教材的优点，并结合编者近年来的教学实践和改革成果编写而成的。

全书共 13 章，内容包括绪论、确定信号分析、随机信号与噪声、信道与线性调制、模拟角度调制系统、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、正交编码与伪随机序列、同步原理、通信网、现代通信新技术等。

本书的特点如下：

(1) 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，又突出通信系统理论的实现技术。

(2) 以 MATLAB 和 SystemView 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”课程的实验中，使一些抽象的概念和原理可视化。

(3) 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，可以使学生在学习过程中通过仿真实验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。

本书的参考教学时数为 64~90 学时。使用本书时，可根据不同的教学要求灵活讲授。

全书由李永忠负责统稿，第 3 章、第 12 章和各章的仿真实验部分由徐静编写，其余内容由李永忠编写。本书的 SystemView 仿真实验由盛立红、武小凤、李令伟等同学完成，MATLAB 仿真实验由姜兆刚和朱锋同学完成。此外，吴峰梅对本书进行了校对。

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

编 者

2010 年 2 月

目 录

第 1 章 绪论	1	2.5.2 解析法——等效低通网络 函数法	35
1.1 通信技术的发展与展望	1	2.6 复数信号与时域	
1.2 信息、信息量与信道容量公式	3	希尔伯特(Hilbert)变换	36
1.2.1 消息、信号与信息	3	2.6.1 复数信号的定义	36
1.2.2 信息量	4	2.6.2 复数信号的实部与 虚部及希尔伯特变换	37
1.2.3 平均信息量	5	2.6.3 实时间信号的复指数表示和 解析信号表示	39
1.2.4 香农信道容量公式	6	2.6.4 窄带实时间信号自相关函数的 复数化求解	40
1.3 通信系统模型	8	2.7 计算机仿真的一般方法	41
1.3.1 通信系统的一般模型	8	2.7.1 信号及系统在计算机中的表示	41
1.3.2 通信系统的分类	10	2.7.2 模拟(连续)信号用 数字(离散)信号处理	42
1.3.3 模拟通信系统和数字通信系统	12	2.7.3 谱分析方法的应用	43
1.4 通信系统的主要性能指标	13	习题	45
1.4.1 有效性	13	第 3 章 随机信号与噪声	49
1.4.2 可靠性	14	3.1 随机过程的基本概念	49
1.5 通信仿真工具介绍	14	3.2 随机过程的数学描述	50
1.5.1 MATLAB 简介	15	3.2.1 随机过程的分布函数和 概率密度函数	50
1.5.2 Simulink 简介	15	3.2.2 随机过程的数字特征	51
1.5.3 SystemView 简介	17	3.3 平稳随机过程	54
习题	18	3.3.1 平稳随机过程的定义	54
第 2 章 确定信号分析	20	3.3.2 平稳随机过程的一维及 二维概率密度函数	54
2.1 信号的正交分解与频谱分析	20	3.3.3 平稳随机过程的数字特征	55
2.1.1 信号的正交分解	20	3.3.4 平稳随机过程自相关函数的 性质	55
2.1.2 信号的频谱分析	22	3.3.5 平稳随机过程的各态历经性	56
2.2 能量信号与功率信号	24	3.4 平稳随机过程的自相关函数与 功率谱密度的关系	57
2.2.1 能量信号与能量谱密度函数	24	3.5 正态随机过程	60
2.2.2 功率信号与功率谱密度函数	25	3.5.1 正态随机过程的定义	60
2.3 相关函数与功率谱密度函数	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 傅立叶变换的不足与 信号的时-频分析法	31		
2.5 窄带系统与窄带信号分析	34		
2.5.1 傅立叶反变换法	34		

3.5.2 正态随机过程的性质	60	5.2.2 简谐信号(单音)调制时的 宽带调频	127
3.6 通过线性系统的平稳随机过程	61	5.2.3 卡森带宽	130
3.7 白噪声、散弹噪声和热噪声	65	5.3 调频信号的产生与解调	130
3.8 通过窄带线性系统的白色随机 过程——窄带噪声	67	5.3.1 调频信号的产生	130
3.8.1 窄带噪声的波形特征	68	5.3.2 调频信号的解调	131
3.8.2 $n_c(t)$ 和 $n_s(t)$ 与 $R(t)$ 和 $\theta(t)$ 的 统计特性	69	5.4 调频系统的抗噪声性能分析	133
3.9 正弦波加窄带高斯噪声的统计特性	73	5.4.1 窄带调频系统的抗噪声性能	133
本章仿真实验举例	75	5.4.2 宽带调频系统的抗噪声性能	135
习题	77	5.5 预加重和去加重技术对 噪声特性的改善	140
第4章 信道与线性调制	81	5.6 频分复用	143
4.1 信道	81	5.7 模拟调制系统的应用实例	144
4.1.1 信道的基本概念	81	本章仿真实验举例	146
4.1.2 信道容量	82	习题	151
4.1.3 信道特性	83	第6章 信源编码	154
4.1.4 编码与调制	88	6.1 抽样定理	154
4.2 线性调制	89	6.1.1 低通信号的抽样定理	154
4.2.1 标准振幅调制	90	6.1.2 自然抽样	157
4.2.2 抑制载波双边带调制	95	6.1.3 带通信号的抽样定理	158
4.2.3 单边带调制	97	6.2 离散无记忆信源(DMS)编码	160
4.2.4 残留边带调制	101	6.2.1 等长编码	160
4.3 幅度调制系统的一般模型	104	6.2.2 不等长编码	160
4.4 幅度调制信号解调的一般模型	105	6.3 脉冲编码调制(PCM)	162
4.4.1 同步解调	105	6.3.1 PCM基本原理	162
4.4.2 包络解调	105	6.3.2 均匀量化与量化噪声	163
4.5 幅度调制系统的抗噪声性能	106	6.3.3 压扩原理与非均匀量化	165
4.5.1 通信系统抗噪声性能 的分析模型	106	6.3.4 PCM编码	168
4.5.2 幅度调制系统同步解调时的 抗噪声性能	108	6.3.5 PCM译码	172
4.5.3 幅度调制系统包络解调时的 抗噪声性能	111	6.4 PCM系统的抗噪声性能	173
本章仿真实验举例	113	6.4.1 量化噪声的影响	173
习题	120	6.4.2 误码对输出信号的影响	174
第5章 模拟角度调制系统	123	6.5 自适应差分脉冲编码调制 (ADPCM)	175
5.1 角度调制的基本概念	123	6.6 增量编码调制(DM或 ΔM)	176
5.1.1 相位调制	124	6.6.1 ΔM 的基本原理	176
5.1.2 频率调制	124	6.6.2 量化噪声与过载量化噪声	178
5.2 调频信号频谱分析与 卡森(Carson)带宽	126	6.6.3 增量编码调制系统的 抗噪声性能	179
5.2.1 窄带调频	127	6.6.4 增量总和($\Delta-\Sigma$)调制和自适应 数字压扩增量调制	180
		6.7 PCM系统与 ΔM 系统的比较	183
		6.8 话音和图像信号的压缩编码	184

6.8.1 语音压缩编码	184	8.2.3 2PSK 与 2DPSK 信号	249
6.8.2 图像压缩编码	186	8.3 二进制数字调制系统的抗噪声性能分析	254
本章仿真实验举例	187	8.3.1 2ASK 系统的抗噪声性能	254
习题	196	8.3.2 2FSK 系统的抗噪声性能	258
第 7 章 数字基带传输系统	199	8.3.3 2PSK 与 2DPSK 系统的抗噪声性能	261
7.1 数字基带信号	200	8.4 各种数字调制系统的性能比较	265
7.1.1 数字基带信号的要求	200	8.5 多进制数字调制系统	266
7.1.2 数字基带信号的波形	200	8.5.1 多进制幅度键控(MASK)	266
7.1.3 常用的基带传输码型	203	8.5.2 多进制移频键控(MFSK)	267
7.2 数字基带信号的功率谱	206	8.5.3 多进制移相键控(MPSK)	268
7.3 无码间串扰传输系统与奈奎斯特(Nyquist)准则	209	8.6 改进型数字调制系统	273
7.3.1 基带系统传输特性及码间串扰	209	8.6.1 正交调幅 QAM	273
7.3.2 无码间串扰系统的特性	210	8.6.2 连续相位移频键控(CPFASK)与 MSK、TMF 调制	278
7.3.3 奈奎斯特第一准则(抽样值无失真条件)	211	8.6.3 高斯最小移频键控(GMSK)	284
7.3.4 奈奎斯特第二准则(转换点无失真条件)	212	8.7 数字信号的最佳接收	286
7.3.5 奈奎斯特第三准则(脉冲波形面积保持不变条件)	213	8.7.1 数字信号接收的统计描述	286
7.3.6 无码间串扰的滚降系统特性	213	8.7.2 确知信号的最佳接收机	288
7.4 部分响应系统	215	8.7.3 匹配滤波器	291
7.4.1 余弦谱传输特性	215	8.7.4 二进制最佳接收机性能分析	294
7.4.2 正弦谱特性	217	8.8 数字调制系统性能比较	296
7.4.3 部分响应系统特性	217	本章仿真实验举例	299
7.4.4 常用部分响应系统举例	219	习题	309
7.5 基带系统的最佳化	221	第 9 章 差错控制编码	312
7.5.1 理想信道下的最佳基带系统	222	9.1 差错控制编码原理	312
7.5.2 非理想信道下的最佳接收	222	9.1.1 引起误码的原因与降低误码的常用方法	313
7.6 基带系统的抗噪声性能	224	9.1.2 差错控制编码的基本方法与差错控制方式	313
7.6.1 理想系统的抗噪声性能	224	9.1.3 纠错编码的基本原理	317
7.6.2 最佳基带系统的抗噪声性能	226	9.1.4 码间距离 d 与检错纠错能力	319
7.7 均衡器原理	227	9.2 常用简单差错控制编码	322
7.7.1 频域均衡	228	9.2.1 奇偶监督码	322
7.7.2 时域均衡	229	9.2.2 二维奇偶监督码	323
7.8 眼图	233	9.2.3 恒比码	323
本章仿真实验举例	235	9.3 线性分组码	324
习题	238	9.3.1 线性分组码的概念	324
第 8 章 数字载波传输系统	243	9.3.2 线性分组码的监督矩阵	325
8.1 概述	243	9.3.3 线性分组码的生成矩阵	327
8.2 二进制数字已调信号及其功率谱	243	9.3.4 线性分组码的伴随式和检错纠错能力	329
8.2.1 2ASK 信号	243		
8.2.2 2FSK 信号	246		

9.3.5 汉明码	330	11.4.2 直接提取位同步法	407
9.4 循环码	331	11.4.3 位同步相位误差对性能的影响	408
9.4.1 循环码的循环特性与码多项式	331	11.5 群同步	409
9.4.2 循环码的生成多项式与生成矩阵	333	11.5.1 起止式同步法	409
9.4.3 循环码的编码与解码	335	11.5.2 连贯式插入法	410
9.4.4 BCH 码	338	11.5.3 群同步系统的性能	411
9.5 卷积码	340	11.5.4 自群同步简介	412
9.5.1 卷积码编码原理	340	11.6 数字通信网的网同步	413
9.5.2 网格编码调制(TCM)	347	本章仿真实验举例	415
9.5.3 Turbo 码	350	习题	417
本章仿真实验举例	353	第 12 章 通信网	419
习题	362	12.1 通信网概述	419
第 10 章 正交编码与伪随机序列	365	12.1.1 通信网的概念	419
10.1 序列的相关函数	365	12.1.2 计算机通信网与计算机网络	420
10.2 超正交单纯码及哈达吗(Hadamard)矩阵	366	12.1.3 通信网的基本要求	421
10.2.1 超正交单纯码	367	12.1.4 通信网的交换方式	422
10.2.2 哈达吗矩阵 H	369	12.1.5 通信网的约定(协议)	425
10.3 m 序列信号	371	12.2 通信网的组织与结构	427
10.3.1 m 序列的产生	371	12.2.1 通信网的通用两级子网结构	427
10.3.2 特征多项式与序列多项式	374	12.2.2 通信网的拓扑结构	429
10.3.3 m 序列的产生条件	375	12.2.3 网络功能的分层体系结构	430
10.3.4 m 序列信号的性质	375	12.2.4 国际标准通信网的网络体系结构	432
10.3.5 m 序列的应用	379	12.3 数据通信网	433
10.4 巴克(Barker)序列	383	12.3.1 数据通信网的概念	433
10.4.1 巴克序列及其自相关函数	384	12.3.2 利用普通公用电话网进行数据通信	434
10.4.2 巴克序列的演变	384	12.3.3 分组交换网	436
10.4.3 巴克序列的检测	385	12.3.4 数字数据网(DDN)	437
本章仿真实验举例	387	12.4 综合业务数字网(ISDN)简介	439
习题	391	12.4.1 ISDN 的概念	439
第 11 章 同步原理	393	12.4.2 ISDN 的通道类型与接口	440
11.1 同步的基本概念	393	12.5 智能网简介	440
11.2 锁相环(PLL)的基本工作原理	393	12.5.1 智能网的概念	440
11.2.1 模拟锁相环	394	12.5.2 智能网中的业务及其应用举例	441
11.2.2 数字锁相环	396	习题	442
11.3 载波同步	399	第 13 章 现代通信新技术	443
11.3.1 插入导频法	399	13.1 个人通信系统	443
11.3.2 直接提取法	401	13.2 ATM 技术	444
11.3.3 载波同步的性能及相位误差对解调信号的影响	405	13.2.1 ATM 技术的基本原理	444
11.4 码元同步	406	13.2.2 ATM 技术的基本要素	444
11.4.1 插入导频法	406		

13.2.3	ATM 技术在军事通信中的 应用	445	13.6.3	家庭网络 HomeRF 与 HiperLAN 协议	451
13.3	卫星通信技术	445	13.6.4	IrDA	452
13.3.1	卫星通信的特点	445	13.6.5	中国 WLAN 规范	452
13.3.2	卫星通信系统的工作原理	446	13.6.6	WLAN 特性	453
13.3.3	卫星通信系统的组成	447	13.7	超宽带通信 UWB	454
13.3.4	卫星的应用	448	13.8	3G/4G	456
13.4	软件无线电技术	448	13.9	紫外光通信技术	458
13.5	光纤通信技术	449	习题		461
13.6	无线局域网	449	附录 现代通信原理的 MATLAB		
13.6.1	IEEE 802.11 协议标准	450	仿真实验		462
13.6.2	蓝牙(Bluetooth)	451	参考文献		490

第1章 绪论

1.1 通信技术的发展与展望

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。由于电通信方式迅速、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，一般都指“电通信”。

当前，人类社会已步入了信息社会。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，在信息社会中更突显其重要性，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，因此从事通信相关工作的技术人员应该了解通信技术的过去、现在及其未来的发展趋势。

1. 通信的发展简史

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。

1753年2月17日，《苏格兰人》杂志上发表了一封署名为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。

1844年5月24日，莫尔斯从华盛顿到巴尔的摩拍发了人类历史上的第一份电报。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。

1875年6月2日，美国人亚力山大·格雷厄姆·贝尔(Bell Alexander Graham)发明了电话。由于电话直接利用导线上电流的强弱来传送话音信号，因而使通信技术的发展又前进了一大步，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依据。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。

1895年5月7日，波波夫在圣彼得堡的俄国物理化学会的物理分会上，宣读了名为

《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。

1897年5月18日，马可尼进行的横跨布里斯托尔(Bristol)海峡的无线电通信取得成功，通信距离为14公里。

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通信(如广播)，它促进了人类社会文化的交流，并促进了宣传教育的发展，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。

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。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。

随着通信容量的增加和通信范围的扩大，1955年皮尔斯(J. R. Pierce)提出了卫星通信的设想。1958年人类发射了第一颗通信卫星，1962年发射的同步通信卫星为国际间大容量通信奠定了基础。

1960~1970年之间出现了光纤通信。光纤通信容量大，可靠性高。

20世纪70年代出现的计算机通信网络使数据通信得到了迅速发展。今天，Internet网络已遍布全球的每个角落。自20世纪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是一个服务于话音和数据通信业务的综合网络。1984年原CCITT(国际电话电报咨询委员会，1993年ITU(国际电信联盟)改组时将CCITT改名为ITU-T(国际电信联盟电信标准部))提出了ISDN的功能、网络结构、接口及网络互联等方面的一系列建议，之后ISDN技术得到了迅速发展。

20世纪90年代，通信网络和信息化基础建设得到了极大的发展，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。预计到本世纪中期，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)与任何人(Whomever)进行所谓的“5W”通信的理想方式。

2. 中国通信的发展历程

1933年，中国首次使用打字电报机实现电报通信。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。此后，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。同年，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。同年，我国第一个160人工信息台在上海投入使用。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,通信技术经历了从点到点的通信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。

1.2 信息、信息量与信道容量公式

1.2.1 消息、信号与信息

什么是信息?关于信息的定义,至今仍众说纷纭。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。香农在《通信的数学理论》中把信息定义为“人们对事物了解不定性的减少和消除,是两次不定性之差。”维纳在《信息控制论》一书中指出:信息是人们在适应外部世界并使这种适应反作用于外部世界的过程中,同外部世界进行交换的内容的总称。在此我们只从通信的角度来描述信息的定义:信息就是对客观事物认识的不确定性,获取信息就是消除不确定性。获取信息的过程是一个由未知到已知的过程,或者说是由不确定到确定的过程。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。所以,信息也可以定义为受信者在收到消息后,对消息不确定性的减少。信息与消息的关系是:消息是信息的载体,信息是消息的内容;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来说信息的多少也不同。在数据通信中,消息也称为报文或数据。

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。那么消息、信号和信息之间的关系又是怎样的呢?

消息由信源产生,它具有各种不同的形式和内容,如气象中的温度和天气的变化、电话和广播中的话音、电视中的图像画面、电报中的文字、计算机中的数据等,都是消息。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,如电话中的话音和电视中的画面,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。不管是连续消息还是离散消息,它们都具有一个共同特点:消息随时间随机地变化。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,是可以被传输和处理的的具体形式,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。信号随着消息的变化而变化,而消息又随着信息的变化而变化,人们无法预测。所以,信号或消息的这种“不可预测”的变化就是信号或消息的本质内容,即信号或消息所含的信息。

所以,简单地讲,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。获取信息就是消除对消息的不确定性。信息是一个含义广泛、抽象的概念。各种随机变化的消息都含有一定量的信息,如社会科学中的经济信息、生活信息和科研中的地震信息、气象信息等。

1.2.2 信息量

消息中包含信息的多少用信息量来度量。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,有两条消息:“今年的应届本科毕业生找工作比去年更难一些”和“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一些,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时,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 $P=1/2$ 时,此消息包含的信息量为1 bit。若有 M 个独立等概出现的消息,每个消息出现的概率为 $1/M$,则消息的信息量为

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

信息量在工程上的定义是指传输该消息所需的最少的二进制脉冲数。当传输两个互相独立且等概出现的消息时,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1 bit。若要传输四个独立等概的消息之一,则至少需2位二进制脉冲,因此,消息具有2 bit的信息量。若有 M 个独立等概的消息之一要传送,且满足 $M=2^k$ ($k=1, 2, 3, \dots$),则此消息可用 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

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

可以看出,工程上定义的信息量与直观理解的信息量是一致的。

一般消息是由符号来表达的,消息所含的信息量即符号所含的信息量,所以式(1.1)中的 P 是消息出现的概率,也就是符号出现的概率。

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

$$I = - \sum_{i=1}^m n_i \text{lb} P(x_i) \quad (1.3)$$

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。以上讨论了离散消息的信息量。由抽样定理可知,一个频带有限的连续信号,可用每秒一定数目的离散脉冲抽样值代替。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。例如,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

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

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

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

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, 各符号出现的概率分别为 $3/8$ 、 $1/4$ 、 $1/4$ 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: 利用信息量的相加性计算, 即

$$\begin{aligned} I &= -\sum_{i=1}^4 n_i \text{lb}P_i = -23 \text{lb} \frac{3}{8} - 14 \text{lb} \frac{1}{4} - 13 \text{lb} \frac{1}{4} - 7 \text{lb} \frac{1}{8} \\ &= 32.55 + 28 + 26 + 21 = 107.55 \quad (\text{bit}) \end{aligned}$$

解法二: 利用平均信息量计算, 即

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

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:

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

如果信源中各符号的出现是统计相关的, 则式(1.5)就不再适用了, 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

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

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

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

当 A、B 两个符号独立出现时, 信源的平均信息量为

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

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, 当信源中各符号的出现独立(即每个符号独立出现)并且等概时, 出现概率 $P=1/n$, 则这时 $H(x)$ 具有最大值, 为

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

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

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的定义和计算方法。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，因此传递的信息会丢失，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，则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噪声(AWGN, Additive White Gaussian Noise)，噪声功率为 N (瓦特)，信道的带宽为 B (赫兹)，信号的平均功率为 S (瓦特)，则信道容量为

$$C = B \text{lb}\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (1.14)$$

这就是著名的香农(Shannon)公式。

在此不严格证明香农公式，仅从工程的角度说明该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。若符号出现是等概的，则传送每种幅值的脉冲代表着传送了 $\text{lb}M$ 比特的信息量。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 N 瓦特，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 S 瓦特，则接收端的总功率为 $S+N$ 瓦特，这时接收端信号的最大分层数为

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

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

$$H(x) = \text{lb}M = \text{lb}\left(1 + \frac{S}{N}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.16)$$

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), 连续信道的信道容量为

$$C = 2B \text{lb}\left(1 + \frac{S}{N}\right)^{\frac{1}{2}} = B \text{lb}\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (1.17)$$

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。由式(1.17)可以看到, 信道容量取决于三个要素, 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:

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

利用公式 $\lim_{x \rightarrow \infty} x \text{lb}\left(1 + \frac{1}{x}\right) \approx \text{lb} e \approx 1.44$, 则式(1.18)变为

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

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且有用的公式, 它把通信系统追求的两大重要指标——有效性和可靠性结合了起来, 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 30 dB 的信道中传输, 要求 3 分钟传完, 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, 因此每个像素包含的信息量为 $\text{lb}16 = 4$ bit。

一幅彩色图片包含的总信息量为

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

要求 3 分钟传完该图片, 则信道的信息传输速率为

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

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

$$B = \frac{C}{\text{lb}\left(1 + \frac{S}{N}\right)} = \frac{6.67 \times 10^4}{\text{lb}(1 + 1000)} \approx 6.69 \times 10^3 \text{ (Hz)}$$

1.3 通信系统模型

1.3.1 通信系统的一般模型

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, 传输的