



工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

张水英 徐伟强 编著

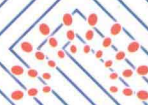
通信原理及MATLAB/ Simulink仿真

浙江省精品课程配套教材
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Principles and MATLAB/Simulink
Simulations of Communications



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



高校系列



工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

张水英 徐伟强 编著

通信原理及MATLAB/ Simulink仿真

浙江省精品课程配套教材
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Principles and MATLAB/Simulink
Simulation of Communications

藏书章

人民邮电出版社

北京



高校系列

图书在版编目(CIP)数据

通信原理及MATLAB/Simulink仿真 / 张水英, 徐伟强
编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2012. 9
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-28040-4

I. ①通… II. ①张… ②徐… III. ①Matlab软件—应用—通信系统—系统仿真—高等学校—教材②计算机辅助计算—软件包—应用—通信系统—系统仿真—高等学校—教材 IV. ①TP391.75②TN914

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第107298号

内 容 提 要

本书较全面、系统地介绍现代通信技术的基本原理, 并通过 MATLAB/Simulink 进行建模与仿真, 另外还简要讲解几种实际应用中的典型通信系统。

本书共 8 章, 主要内容包括模拟通信系统和数字通信系统的基本概念, 信道与噪声的特征, 模拟调制传输, 模拟信号的数字传输, 数字信号的基带传输, 数字信号的频带传输, 同步原理, 信道编码技术; 每章最后一节是用 MATLAB/Simulink 对本章内容进行建模与仿真; 每章结束后附有小结及相应习题; 书后附有常用三角公式、傅氏变换、误差函数、互补误差函数表。

本书内容全面, 概念清晰; 理论分析由浅入深, 注重联系实际; 许多图形是计算机仿真的结果。本书可作为高等院校通信、电子信息等相关专业的本科生教材, 也可作为相关专业研究生和通信工程技术人员的参考书。

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材

通信原理及 MATLAB/Simulink 仿真

- ◆ 编 著 张水英 徐伟强
责任编辑 董 楠
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京鑫正大印刷有限公司印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 20 2012 年 9 月第 1 版
字数: 490 千字 2012 年 9 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-28040-4

定价: 42.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

通信原理属于电子信息类各专业的专业基础课，是通信工程、电子信息工程专业学生的必修课，还是相关专业硕士研究生入学考试科目之一。随着现代通信技术的发展和深入，计算机科学与技术、自动控制以及光电子等专业也纷纷开设通信原理课程。作为一门专业基础课程，通信原理是学习其他后续专业课程的基础，因此学好通信原理课程对于专业学习来说具有非常重要的意义。

另一方面，系统建模和仿真技术已日益成为现代理工科各专业进行科学探索、系统可行性研究和工程设计不可缺少的重要环节。MATLAB 语言由于其诸多优点，吸引了众多科学研究工作者，越来越成为科学研究、数值计算、建模仿真以及学术交流的事实标准。Simulink 作为 MATLAB 语言上的一个可视化建模仿真平台，起源于对自动控制系统的仿真需求。它采用方框图建模的形式，更加贴近于工程习惯。随着 MATLAB/Simulink 通信、信号处理专业函数库和专业工具箱的成熟，它们逐渐为广大通信技术领域的专家学者和工程师所熟悉，在通信理论研究、算法设计、系统设计、建模仿真和性能分析验证等方面的应用也更加广泛。

本书以通信原理的理论分析为主，共分 8 章内容。第 1 章为绪论，讨论通信系统组成、分类；通信方式；信息及其度量；通信系统的主要性能指标等。第 2 章为信道与噪声，讨论信道分类；信道对信号的影响；信道中的加性噪声；信道容量等。第 3 章为模拟调制系统，主要分析线性模拟调制系统及非线性模拟调制系统的原理及抗噪声性能；频分复用及多级调制。第 4 章为模拟信号的数字化传输，主要讨论抽样、量化、各种信源编码及时分复用。第 5 章为数字信号基带传输系统，讨论数字基带信号码型及功率谱密度；能实现无码间干扰传输的几种系统；无码间干扰传输系统的抗噪声性能；眼图；时域均衡器等。第 6 章为数字信号频带传输系统，讨论二进制数字调制原理及抗噪声性能；多进制数字调制系统。第 7 章为同步原理，讨论载波同步、位同步、群同步、网同步的方法、性能及对解调的影响。第 8 章为信道编码，讨论差错控制编码原理；各种差错控制编码方法。

理论的学习必须得有实践的支持，理论的检验和验证也须通过实践。系统仿真技术是专业理论和系统实验相结合的有效途径之一。因此每章最后一节是用 MATLAB/Simulink 对本章内容进行建模与仿真。通过对各种通信系统的建模、参数设计及仿真结果分析，一方面验证理论知识，另一方面讲解在 MATLAB/Simulink 平台上如何构建通信系统模型，如何设置参数，如何显示仿真结果及如何分析仿真结果。另外，本书还简要讲解几种实际

应用中的典型通信系统。每章后面附有小结及习题，且书后附有常用三角公式、傅氏变换、误差函数、互补误差函数表及部分习题答案。

本书内容全面，概念清晰；理论分析由浅入深，注重联系实际；为帮助读者掌握基本理论和分析方法，每章都列举许多例题；插图丰富，很多图形是计算机仿真的结果。本书可作为高等院校通信、电子信息等相关专业的本科生教材，也可作为相关专业研究生和通信工程技术人员的参考书。

本书由张水英编写第1章、第2章、第3章、第5章、第6章、第8章和附录，徐伟强编写第4章和第7章，金立协助编写第8章。

鉴于作者水平有限，书中难免有错误和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2012年4月

目 录

第1章 绪论	1	2.3 恒参信道及其对信号的影响	24
1.1 通信的基本概念	1	2.3.1 典型恒参信道	24
1.1.1 消息、信息和信号	1	2.3.2 恒参信道一般特性	27
1.1.2 通信	1	2.3.3 理想恒参信道	27
1.1.3 通信发展概况	2	2.3.4 实际信道	28
1.2 通信系统模型	2	2.3.5 其他影响因素	30
1.2.1 通信系统一般模型	2	2.4 随参信道及其对信号的影响	30
1.2.2 模拟通信系统模型	4	2.4.1 典型随参信道	30
1.2.3 数字通信系统模型	4	2.4.2 随参信道特点	32
1.2.4 数字通信系统特点	4	2.4.3 随参信道对信号影响	32
1.3 通信系统分类及通信方式	5	2.5 分集接收	34
1.3.1 通信系统分类	5	2.5.1 基本思想	34
1.3.2 通信方式	6	2.5.2 分集方式	34
1.4 信息度量	7	2.5.3 合并方式	35
1.4.1 信息量概念	7	2.6 信道的加性噪声	35
1.4.2 平均信息量概念	8	2.6.1 加性噪声的来源	35
1.5 通信系统主要性能指标	9	2.6.2 噪声种类	35
1.5.1 模拟通信系统性能指标	10	2.6.3 起伏噪声	36
1.5.2 数字通信系统性能指标	10	2.7 信道容量概念	36
1.6 MATLAB/Simulink 系统建模与仿真基础	12	2.7.1 信道容量定义	36
1.6.1 通信系统仿真优点	12	2.7.2 离散信道容量	37
1.6.2 通信系统仿真工具	13	2.7.3 连续信道容量	39
1.6.3 通信系统常用模块库简介	13	2.8 MATLAB/Simulink 简单通信系统建模与仿真	40
1.6.4 Simulink 使用简介	14	2.8.1 信源模块	40
小 结	18	2.8.2 信道模块	42
习 题	19	2.8.3 信号观察模块	43
第2章 信道与噪声	21	2.8.4 简单通信系统建模与仿真	44
2.1 信道及其分类	21	小 结	45
2.1.1 信道定义	21	习 题	47
2.1.2 信道分类	21	第3章 模拟调制系统	49
2.2 信道模型	22	3.1 模拟调制基本概念	49
2.2.1 调制信道模型	22	3.1.1 模拟调制概念	49
2.2.2 编码信道模型	23	3.1.2 模拟调制功能	49

3.1.3	模拟调制分类	50
3.2	线性调制原理	51
3.2.1	线性调制一般原理	51
3.2.2	振幅调制	51
3.2.3	抑制载波双边带调制	54
3.2.4	单边带调制	56
3.2.5	残留边带调制	60
3.3	线性调制系统抗噪声性能	61
3.3.1	抗噪声性能分析模型	61
3.3.2	相干解调输出端信噪比	62
3.3.3	非相干解调输出端信噪比	66
3.4	非线性调制原理和抗噪声性能	68
3.4.1	角度调制概念	69
3.4.2	调频信号带宽	70
3.4.3	调频信号解调输出性能	72
3.5	模拟调制系统性能比较	76
3.5.1	有效性比较	76
3.5.2	可靠性比较	76
3.5.3	特点及应用	77
3.6	频分复用与多级调制	77
3.6.1	频分复用	77
3.6.2	复合调制和多级调制	78
3.7	模拟通信系统应用实例	79
3.7.1	载波电话系统	79
3.7.2	调幅广播	81
3.7.3	调频广播	81
3.7.4	地面广播电视	82
3.7.5	卫星直播电视	83
3.7.6	通信卫星的频分多址方式	84
3.8	MATLAB/Simulink 模拟通信系统建模与仿真	85
3.8.1	模拟调制解调模块	85
3.8.2	调幅广播系统建模与仿真	87
3.8.3	调幅包络检波和相干解调仿真	89
3.8.4	调频立体声广播系统的建模与仿真	92
小 结		94
习 题		96

第 4 章	模拟信号数字化传输	100
4.1	抽样定理	100
4.1.1	低通抽样定理	100
4.1.2	带通抽样定理	103
4.2	脉冲振幅调制 (PAM)	104
4.2.1	脉冲调制	104
4.2.2	PAM 原理	105
4.3	量化	108
4.3.1	量化基本概念	108
4.3.2	均匀量化	110
4.3.3	非均匀量化	112
4.4	脉冲编码调制 (PCM)	116
4.4.1	PCM 通信系统框图	116
4.4.2	逐次反馈型编码实现	120
4.4.3	逐次反馈型译码实现	121
4.4.4	PCM 编码速率及信号带宽	122
4.4.5	PCM 抗噪声性能	123
4.5	差分脉冲编码调制 (DPCM)	127
4.5.1	差分脉冲编码调制	128
4.5.2	自适应差分脉冲编码调制	129
4.6	增量调制 (DM)	129
4.6.1	简单增量调制	130
4.6.2	自适应增量调制	137
4.7	时分复用及应用实例	137
4.7.1	时分复用	137
4.7.2	数字电话系统	139
4.7.3	数字电话系统帧结构与速率	140
4.7.4	数字复接技术	141
4.8	MATLAB/Simulink PCM 串行传输系统建模与仿真	146
4.8.1	PCM 编码器建模与仿真	146
4.8.2	PCM 译码器建模与仿真	147
4.8.3	PCM 串行传输系统建模与仿真	147
4.8.4	PCM 串行传输系统音质测试	148
小 结		149
习 题		150
第 5 章	数字信号基带传输系统	152

5.1 数字基带传输系统构成.....	152	小 结	191
5.2 数字基带信号常用码型.....	154	习 题	192
5.2.1 数字基带信号码型设计		第 6 章 数字信号频带传输系统.....	196
原则	154	6.1 二进制数字调制.....	196
5.2.2 二元码.....	154	6.1.1 二进制幅度键控	197
5.2.3 三元码.....	157	6.1.2 二进制移频键控	201
5.2.4 多元码.....	158	6.1.3 二进制移相键控	204
5.3 数字基带信号功率谱.....	159	6.1.4 差分移相键控	207
5.3.1 数字基带信号功率谱密度.....	159	6.2 二进制数字调制系统抗噪声	
5.3.2 功率谱密度计算举例.....	164	性能	212
5.4 数字基带传输中码间串扰.....	165	6.2.1 2ASK 系统抗噪声性能	212
5.4.1 码间串扰概念.....	165	6.2.2 2FSK 系统抗噪声性能.....	215
5.4.2 码间串扰数学分析.....	166	6.2.3 2PSK/2DPSK 系统抗噪声	
5.4.3 码间串扰消除.....	167	性能	217
5.5 无码间串扰基带传输系统.....	168	6.3 二进制调制系统性能比较.....	218
5.5.1 无码间串扰基带传输系统		6.3.1 频带宽度	218
要求	168	6.3.2 误码率比较	218
5.5.2 理想基带传输系统.....	168	6.3.3 对信道特性变化的敏感性	
5.5.3 无码间串扰系统等效传输		比较	220
特性	170	6.3.4 设备复杂程度比较	221
5.5.4 升余弦滚降传输特性.....	172	6.4 多进制数字调制系统.....	221
5.6 无码间串扰时噪声对传输性能的		6.4.1 多进制数字振幅调制系统.....	221
影响	174	6.4.2 多进制数字频率调制系统.....	224
5.6.1 发“0”码时取样判决器输入端		6.4.3 多进制数字相位调制系统.....	225
信号加噪声概率分布.....	174	6.4.4 正交幅度调制	230
5.6.2 发“1”码时取样判决器输入端		6.5 MATLAB/Simulink 二进制数字频带	
信号加噪声概率分布.....	174	传输系统建模与仿真	232
5.6.3 误码率计算.....	175	6.5.1 2ASK 数字频带传输系统建模	
5.6.4 单极性情况时误码率计算.....	176	与仿真	232
5.7 眼图.....	177	6.5.2 2FSK 数字频带传输系统建模	
5.8 时域均衡.....	179	与仿真	234
5.9 部分响应系统.....	181	6.5.3 2PSK 数字频带传输系统建模	
5.9.1 第 I 类部分响应系统原理	182	与仿真	236
5.9.2 第 I 类部分响应系统组成	183	6.5.4 2DPSK 数字频带传输系统	
5.9.3 部分响应系统一般形式.....	185	建模与仿真	237
5.10 MATLAB/Simulink 数字基带传输		小 结	238
系统建模与仿真	186	习 题	240
5.10.1 基带传输码型建模与仿真.....	186	第 7 章 同步原理	242
5.10.2 基带传输系统建模与仿真.....	188	7.1 载波同步	242

7.1.1 载波同步方法	242	8.2.1 奇偶校验码	269
7.1.2 载波同步性能	247	8.2.2 行列奇偶校验码	269
7.1.3 载波同步性能对解调的影响	248	8.2.3 恒比码	270
7.2 位同步	248	8.3 线性分组码	271
7.2.1 位同步方法	248	8.3.1 线性分组码编码	271
7.2.2 位同步性能	252	8.3.2 线性分组码校验	272
7.2.3 位同步性能对解调的影响	253	8.3.3 线性分组码译码	274
7.3 群同步	253	8.3.4 线性分组码的编译码电路	275
7.3.1 群同步方法	253	8.3.5 汉明码	277
7.3.2 群同步性能	256	8.4 循环码	278
7.4 网同步	257	8.4.1 循环码基本概念	278
7.4.1 网同步目的	257	8.4.2 循环码生成多项式	280
7.4.2 网同步方法	257	8.4.3 循环码编码	280
7.5 MATLAB/Simulink 载波同步建模与仿真	258	8.4.4 循环码译码	283
7.5.1 平方环法载波同步建模与仿真	258	8.5 卷积码	285
7.5.2 科斯塔斯环法载波同步建模与仿真	260	8.5.1 卷积码编码	285
小 结	262	8.5.2 卷积码图形描述	286
习 题	263	8.5.3 卷积码维特比译码	288
第 8 章 信道编码	265	8.6 交织码	290
8.1 信道编码基本概念	265	8.7 数字通信系统应用实例	292
8.1.1 信道编码的检错、纠错原理	265	8.7.1 GSM 数字移动通信系统	292
8.1.2 码长、码重、码距、编码效率	266	8.7.2 CDMA 移动通信系统	295
8.1.3 最小码距与检纠错能力的关系	267	8.8 MATLAB/Simulink 信道编码建模与仿真	299
8.1.4 信道编码分类	267	8.8.1 线性码建模与仿真	299
8.1.5 差错控制方式	268	8.8.2 循环码建模与仿真	300
8.2 常用检错码	269	8.8.3 卷积码建模与仿真	301
		8.8.4 3 种差错控制编码性能比较	302
		小 结	302
		习 题	304
		附录 1 常用三角公式	307
		附录 2 傅氏变换	308
		附录 3 误差函数、互补误差函数表	311

人类社会需要进行信息交互，社会越进步，交互信息会越多。通信系统是人类社会进行信息交互的工具。在通信系统的发展过程中产生了很多理论，如信息论、调制理论、编码理论等，也出现了多种多样的通信手段，如有线通信、无线通信、卫星通信、移动通信等。尤其是近 20 年来，通信技术得到了飞速发展，通信技术与计算机技术结合，在微电子技术的支持下形成了新的学科——信息学科。通信作为信息学科的一个重要领域，不但与人类的社会活动、个人生活与科学活动密切相关，而且也有其独立的技术理论体系。

本书讨论信息的传输、交换。在深入讨论上述内容之前，先简要讨论通信系统的有关基础知识。

1.1 通信的基本概念

1.1.1 消息、信息和信号

人类社会是建立在信息交流基础之上的，特别是当今世界已进入信息时代，我们正越来越多地接触到信息这一概念，但是信息到底是什么呢？我们平常所说的消息又是什么？它们之间是什么关系？它们与前导课中的信号又是什么关系呢？

消息是对事物物理状态的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。如温度、语音、图像、文字等。

信息是消息中所包含的有意义的内容，它是一个抽象的概念。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。

消息是信息的载体，不同形式的消息，可以包含相同的信息，例如分别用电视和报纸发布同一条新闻，所含信息内容是相同的。信息的传递、交换必须通过消息的传递、交换才能完成。

信号是为了传送消息，对消息进行变换后在通信系统中传输的某种物理量，如电信号、光信号等。因此，信号是由消息转换来的并可以被传输和处理的具体形式，是消息的运载工具。

1.1.2 通信

通信就是由一地向另一地传递信息（或消息）。实现通信的方式很多，古代的烽火台、

金鼓、旌旗，现代的信函、电报、电话、电视等均属于通信的范畴。在各种各样的通信方式中，利用“电”来传送消息的通信方式（电通信）是最有效的。电通信方式能使消息几乎在任意的通信距离上实现迅速、有效、准确、可靠的传递，因此它的发展非常迅速，应用极其广泛。

1.1.3 通信发展概况

现代通信一般是指电通信，国际上称为远程通信（tele-communication）。

1837 年，莫尔斯（S. Morse）发明电报系统，此系统于 1844 年在华盛顿和巴尔迪摩尔之间试运行。这可认为是电通信或远程通信，也是数字通信的开始。

1864 年，麦克斯韦（J.C. Maxwell）建立电磁场理论。

1876 年，贝尔（A.G. Bell）发明了电话，成为模拟通信的先驱。

1887 年，赫兹（H. Hertz）实验证明电磁波的存在。

1892 年，美国史端乔（A.B. Strowger）发明步进式电话交换机。

1901 年，马可尼（G. Marconi）成功进行从英国到纽芬兰的跨大西洋的无线通信。

1918 年，调幅无线广播商用。

1936 年，调频无线广播商用。

1937 年，发现脉冲编码调制原理。

1938 年，黑白电视广播系统商用。

1940 年～1945 年，“二战”刺激了雷达和微波通信系统的发展。

1948 年，香农提出信息论；发明晶体管。

1950 年，时分多路通信应用于电话。

1956 年，敷设了越洋电缆。

1957 年，发射第一颗人造卫星。

1958 年，发射第一颗通信卫星。

1960 年，发明激光。

1961 年，发明集成电路。

1960 年～1970 年，彩色电视机问世；阿波罗宇宙飞船登月；数字传输理论和技术得到迅速发展；出现高速数字电子计算机。

1970 年～1980 年，大规模集成电路，商用卫星通信，程控数字交换机，光纤通信系统，微处理机等迅速发展。

1980 年以后，互联网崛起。

进入 21 世纪以后，随着微电子技术和计算机技术的发展，通信技术将沿着数字化、远程与大容量化、网络与综合化、移动与个人化等方向发展，从而进入一个新的发展阶段。

1.2 通信系统模型

1.2.1 通信系统一般模型

通信系统是指完成通信这一过程的全部设备和传输媒介，一般可概括为如图 1-1 所示的模型。

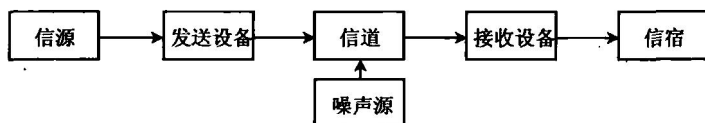


图 1-1 通信系统一般模型

信源：消息的产生地，其作用是把各种消息转换成原始电信号。

发送设备：将原始电信号转换为适于在信道中传输的信号，常包括变换、编码和调制等过程。

信道：将信号由发送设备传输到接收设备的媒介或途径。有无线信道和有线信道之分。

噪声源：散布在系统各部分的噪声的集中表现，不是人为加入的设备。噪声是有害的，会降低通信的质量。

接收设备：将信号转换为原始电信号，常包括解调、译码等过程。

信宿：信息的归宿点，其作用是将接收设备恢复出的电信号转换成相应的消息。

图 1-1 所示中，信源发出的消息具有各种不同的形式和内容，但总的来说可以概括为两大类：一类是模拟消息，如语音、图像等，它们是连续变化的，又称为连续消息；另一类是数字消息，如文字、数据等，又称为离散消息。为了方便传递，各种消息都需要转换成电信号。为了能在接收端准确地从信号中恢复原始消息，消息和电信号之间必须建立严格的对应关系。通常把消息寄托在电信号的某一参量上。按信号参量的取值方式不同可把信号分为两类，即模拟信号和数字信号。

如果电信号的参量携带模拟消息，则该参量必将是连续取值的，称这样的信号为模拟信号，又称连续信号，如图 1-2 (a) 所示。这个连续是指信号参量可以连续变化，而不一定在时间上也是连续的，如图 1-2 (b) 所示的抽样信号，时间上是离散的，但取值上是连续的，所以它仍是一个模拟信号。

如果电信号的参量携带数字消息，则该参量必是离散取值的，这样的信号就称为数字信号，也称离散信号，如图 1-3 (a) 所示。这个离散是指信号的某一参量是离散变化的，而不一定在幅度上也是离散的。如图 1-3 (b) 所示的 2PSK 信号，幅度是连续的，但相位取值是离散的，所以它是一个数字信号。按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号，可以相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

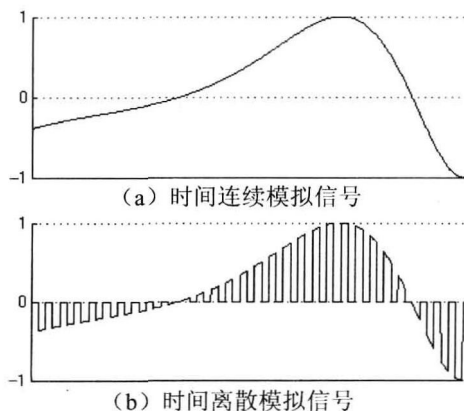


图 1-2 模拟信号

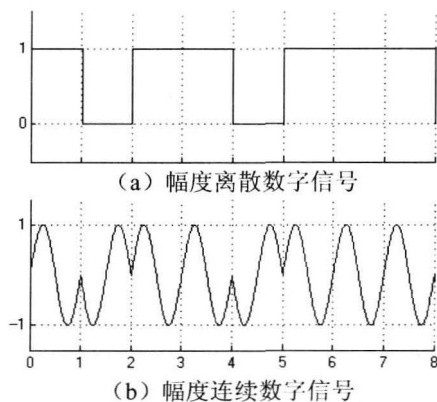


图 1-3 数字信号

图 1-3 数字信号

图 1-1 所示的通信系统模型是对各种通信系统的简化概括,反映的是所有通信系统的共性。根据研究的对象或关心的问题不同,不同的通信系统具有不同形式的系统模型。后续各章都是围绕通信系统的模型展开的,通信原理的研究对象就是通信模型。

1.2.2 模拟通信系统模型

模拟通信系统是利用模拟信号来传递信息的通信系统。系统模型如图 1-4 所示。

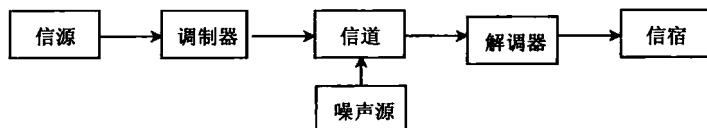


图 1-4 模拟通信系统模型

调制器: 将具有低频分量的原始电信号进行频谱搬移,变换成其频带适合在信道传输的信号,这种变换过程称调制,变换后的信号称已调信号,又称频带信号,其频谱具有带通形式而且中心频率远离零频。未经过调制的原始信号又称基带信号,其频谱从零频附近开始,如语音信号为 300~3 400Hz,图像信号为 0~6MHz。

解调器: 将频带信号恢复成基带信号。

1.2.3 数字通信系统模型

数字通信系统是利用数字信号来传递信息的通信系统。系统模型如图 1-5 所示。

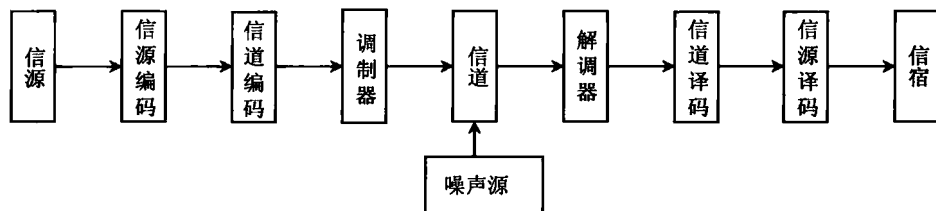


图 1-5 数字通信系统模型

信源编码: 用适当的编码方法降低数字信号的码元速率以提高数字信号传输的有效性。另外,如果信源是数据处理设备,还要进行并/串变换;如果信源产生的是模拟信号,则先要进行模/数转换。此外,数据扰乱、数据加密等都是在信源编码器内完成。

信道编码: 在信息码组中按一定的规则附加一些码,接收端根据相应的规则进行检错和纠错,以提高数字信号传输的可靠性,信道编码又称差错控制编码。

信道译码: 信道编码的逆过程。

信源译码: 信源编码的逆过程。

但是有的实际数字通信系统并非包括所有环节。如图 1-5 所示的通信系统称为数字频带传输系统,图中如果不包括调制器和解调器,称数字基带传输系统;图中如果包括模/数转换环节,则称模拟信号的数字化传输系统。

1.2.4 数字通信系统特点

与模拟通信相比,数字通信有如下优点:

- (1) 抗干扰能力强, 可靠性高;
- (2) 体积小, 功耗低, 易于集成;
- (3) 便于进行各种数字信号处理;
- (4) 有利于实现综合业务传输;
- (5) 便于保密。

但数字通信也有以下两个缺点:

- (1) 占用频带宽;
- (2) 系统和设备比较复杂。

但随着卫星通信、光纤通信等宽频通信系统和压缩技术、集成技术的日益发展, 以上缺点越来越不成为问题, 因此数字化是现代通信的主要发展方向之一。

1.3 通信系统分类及通信方式

1.3.1 通信系统分类

通信系统的分类方法很多, 这里仅讨论由通信系统模型所引出的分类。

按消息的物理特征分类: 通常可以分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统、图像通信系统等。这些通信系统可以是专用的, 但通常是兼容的或并存的。由于电话通信最为发达, 因而其他通信常借助于公共的电话通信系统进行。

按调制方式分类: 根据是否采用调制, 可将通信系统分为基带传输系统和频带传输系统。基带传输系统是将未经调制的信号直接传送, 如音频市内电话等; 频带传输系统是对各种信号调制后传输的总称。调制方式很多, 常用的调制方式见表 1-1。

表 1-1 常用调制方式及用途

调 制 方 式			用 途 举 例
连续调制	线性调制	常规双边带调制 AM	广播
		单边带调制 SSB	载波通信、短波无线电话通信
		双边带调制 DSB	立体声广播
		残留边带调制 VSB	电视广播、传真
	非线性调制	频率调制 FM	微波中继、卫星通信、广播
		相位调制 PM	中间调制方式
	数字调制	振幅键控 ASK	数据传输
		频移键控 FSK	数据传输
		相移键控 PSK、DPSK	数据传输
		其他高效数字调制 QAM、MSK 等	数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉幅调制 PAM	中间调制方式、遥测
		脉宽调制 PWM	中间调制方式
		脉位调制 PPM	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉码调制 PCM	卫星、空间通信
		增量调制 ΔM	军用、民用数字电话
		差分脉码调制 DPCM	电视电话、图像编码
		其他编码方式 ADPCM 等	中速数字电话

按信号特征分类：按信道中传输的是模拟信号还是数字信号，可以相应地把通信系统分成模拟通信系统与数字通信系统两类。

按传输媒介分类：按传输媒介可将通信系统分为有线和无线两类。表 1-2 中列出常用的传输媒介及其主要用途。

按信号复用方式分类：传送多路信号有三种常用的复用方式，即频分复用、时分复用、码分复用等。频分复用是用频谱搬移的方法使不同信号占据不同的频率范围；时分复用是用脉冲调制的方法使不同信号占据不同的时间区间；码分复用则是用一组正交的脉冲序列分别携带不同信号。

传统的模拟通信中都采用频分复用。随着数字通信的发展，时分复用通信系统的应用越来越广泛。码分复用多用于空间扩频通信系统中，目前又开始用于移动通信系统中。

表 1-2 常用传输媒介及用途

频率范围	波长	符号	传输媒介	用途
3Hz~30kHz	$10^8 \sim 10^4 \text{m}$	甚低频 VLF	有线线对 长波无线电	音频、电话、数据终端、长距离导航
30kHz~300kHz	$10^4 \sim 10^3 \text{m}$	低频 LF	有线线对 长波无线电	导航、信标、电力线通信
300kHz~3MHz	$10^3 \sim 10^2 \text{m}$	中频 MF	同轴电缆 中波无线电	调幅广播、移动陆地通信、业余无线电
3MHz~30MHz	$10^2 \sim 10 \text{m}$	高频 HF	同轴电缆 短波无线电	移动无线电话、短波广播、定点军用通信、业余无线电
30MHz~300MHz	$10 \sim 1 \text{m}$	甚高频 VHF	同轴电缆 米波无线电	电视、调频广播、空中管制、车辆通信、导航
300MHz~3GHz	$100 \sim 10 \text{cm}$	特高频 UHF	波导 分米波无线电	电视、空间遥测、雷达导航、点对点通信、移动通信
3GHz~30GHz	$10 \sim 1 \text{cm}$	超高频 SHF	波导 厘米波无线电	微波接力、卫星和空间通信、雷达
30GHz~300GHz	$10 \sim 1 \text{mm}$	极高频 EHF	波导 毫米波无线电	雷达、微波接力、射电天文学
$10^5 \text{GHz} \sim 10^7 \text{GHz}$	$3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-6} \text{cm}$	紫外、可见光、红外	光纤 激光空间传播	光通信

1.3.2 通信方式

1. 按消息传送的方向与时间分

对于点到点之间的通信，按消息传送的方向与时间的关系，通信方式可分为单工通信、半双工通信及全双工通信三种。

单工通信是指消息只能单方向传输的工作方式，如图 1-6 (a) 所示。例如：遥控、遥测、广播、电视等。

半双工通信是指通信双方都能收发消息，但不能同时进行收发的工作方式，如图 1-6 (b)

所示。例如：使用同一载频工作的无线电对讲机就是按这种通信方式工作的。

全双工通信是指通信双方可同时进行收发消息的工作方式，如图 1-6 (c) 所示。例如：电话、手机等。

2. 按数字信号码元排序方式分

数字通信中，按照数字信号码元排列方法不同，通信方式可分为串行传输和并行传输。

串行传输是指数字信号码元序列按时间顺序一个接一个地在信道中传输。一般的远距离数字通信大多采用串行传输方式，因为这种方式只需占用一条通路，如图 1-7 (a) 所示。

并行传输是指将数字信号码元序列分割成两路或两路以上的数字信号，码元序列同时在信道中传输。一般的近距离数字通信可采用并行传输方式，如图 1-7 (b) 所示。

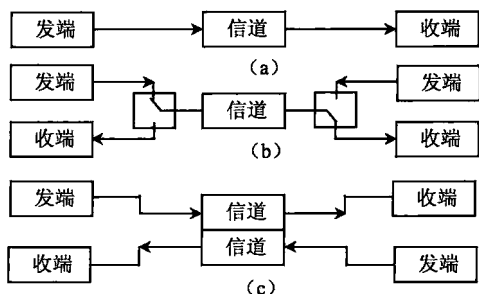


图 1-6 单工、半双工和全双工通信方式

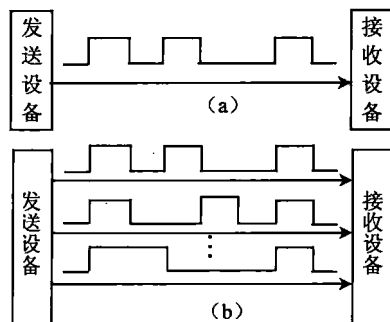


图 1-7 串行传输和并行传输

1.4 信息度量

1.4.1 信息量概念

前面已经指出，信息是包含在消息中的有意义的内容，消息可以有各种各样的形式，但不同形式的消息可以统一用抽象的信息概念来表示，传递的消息都有一个信息量的概念。那么，信息是如何度量的呢？

现假定教师在第一节“通信原理”课将结束时，讲了以下 3 句话中的某一句。

(1) 下次课由我来给大家上课。

(2) 下次课将由另一位老师来给大家上课。

(3) 这门课以后不上了，到学期结束时，老师给每位同学的成绩都是 90 分。

显然，学生听了第一句话后所获得的信息量几乎为 0，因为一般情况下，上第一节课的教师往往会继续上完这门课，也就是第一种情况发生的概率几乎为 1；相对应地，第二种情况发生的概率比第一种情况要小，所以学生听了第二句话后获得的信息量就比较大；再来看第三句话，常理下，这件事是不可能发生的，即这件事出现的概率几乎为 0，现在教师做出了这样的决定并告诉了学生，对学生来讲，这句话就包含了大量的信息。

由此可见，消息中包含的信息量与消息发生的概率是紧密相关的。消息出现的概率越小，则包含的信息量就越大；概率为 0 时，信息量为无穷大；概率为 1 时，信息量为 0。如果我们同时得到几个消息，那么我们得到的信息量将是这几个消息所包含信息量的总和。

基于以上消息的概率和该消息所含信息量之间的关系, 可用下式来表示、

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.4-1)$$

上式中对数的底 a 将决定信息量的单位。哈特雷 (Hartley) 在 1928 年第一次建议了信息量的对数度量, 即使用以 10 为底的对数, 信息的单位是哈特。现在的标准是采用以 2 为底的对数, 信息的单位是比特。有时也使用以 e 为底的对数, 信息的单位是奈特。

【例 1-1】 进行一个具有 16 个等可能结果的随机试验。每一个结果具有的信息量为多少?

解: 因为每一个结果都是等可能出现的, 即每一个结果出现的概率都是 $P(x_i) = \frac{1}{16}$, 则每一个结果具有的信息量为: $I(x_i) = -\log_2 \frac{1}{16} = \log_2 16 = 4$ (bit), 式中 i 从 1 取到 16。

上例是单次试验结果所含的信息, 相当于单个符号所含的信息量, 对于由一串符号构成的消息, 假设各符号的出现互相统计独立, 则根据信息相加性概念, 整个消息的信息量是每个符号信息量的总和。

【例 1-2】 设某消息由 a 、 b 、 c 、 d 4 种符号组成, 其概率分别为 $P(a) = \frac{3}{8}$, $P(b) = \frac{1}{4}$, $P(c) = \frac{1}{4}$, $P(d) = \frac{1}{8}$, 求 $cabacabdacbdabcbadcbabaaadcbabaaadcbacacabadbcbadcbabcbacba$ 的信息量。

解: 此消息总长为 57 个符号, 其中 a 出现 23 次, b 出现 14 次, c 出现 13 次, d 出现 7 次。 a 所带的信息量为 $I(a) = -\log_2 \frac{3}{8}$, b 所带的信息量为 $I(b) = -\log_2 \frac{1}{4}$, c 所带的信息量为 $I(c) = -\log_2 \frac{1}{4}$, d 所带的信息量为 $I(d) = -\log_2 \frac{1}{8}$, 所以, 此消息的信息量为

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

从以上例子可以看到, 当消息很长时, 用符号出现的概率来计算消息的信息量是比较麻烦的, 此时可以用平均信息量的概念来计算。

1.4.2 平均信息量概念

平均信息量是指每个符号所含信息量的统计平均值, 因此, 由 M 个符号组成的消息, 每个符号所含的平均信息量为

$$H(X) = -\sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \text{ (比特/符号)} \quad (1.4-2)$$

上述平均信息量计算公式与热力学和统计力学中关于系统熵的公式一样, 因此平均信息量又叫熵。

【例 1-3】 用平均信息量的概念来计算例 1-2 中消息所含的信息量。

解: 由式 (1.4-2) 得每个符号的平均信息量为

$$H = -\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} = 1.9056 \text{ (bit/符号)}$$

则消息所含的信息量为