



普通高等教育国家级精品教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

通信原理

(第7版)

Principles of Communications
The Seventh Edition

■ 樊昌信 曹丽娜 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

责任编辑：王 华 wanghua6956@163.com
责任校对：钱辉玲
封面设计：蒋秀芹

通信原理

(第7版)

Principles of Communications
The Seventh Edition



◀ 上架建议：通信技术 ▶

<http://www.ndip.cn>

ISBN 978-7-118-08768-0

9 787118 087680 >

定价：58.00 元

014908081

TN91
38-8

— 普通高等教育国家级精品教材

— 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

通信原理

(第7版)

樊昌信 曹丽娜 编著

国防工业出版社



北航

C1694300

TN91
38-8

130800410

林楚品赫恩寒困育楚琴高甄普
林楚收赋恩寒困“五十一”育楚琴高甄普

图书在版编目 (CIP) 数据

通信原理 / 樊昌信, 曹丽娜编著. —7 版. —北京:
国防工业出版社, 2012. 11

ISBN 978-7-118-08768-0

I. ①通... II. ①樊... ②曹... III. ①通信原理
IV. ①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 118214 号

通信原理

(第七版)

※

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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 30¼ 字数 715 千字

2012 年 11 月第 7 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 58.00 元

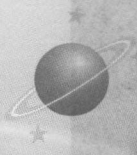
(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717



第7版前言

《通信原理(第7版)》是在第6版的基础上,为了适应当前通信技术和教学需求,并吸取了数十所院校教师的反馈意见修订而成。《通信原理(第7版)》的修订着眼于以下几点:

《通信原理》自1980年第1版发行起,作为全国高等学校工科电子类统编教材,每5年修订一次,出版过6版。30余年来,承蒙全国数百所高等院校选用本书作为大学本科和研究生的教科书及参考书,获得了诸多好评。本教材获得过多项荣誉奖项,包括1983年获世界通信年中国委员会颁发的全国优秀通信科技图书二等奖,1987年获电子工业部优秀教材特等奖,1988年获国家教委全国高等学校优秀教材奖等;第5版为国家级重点教材,并获得2005年陕西省普通高等教育优秀教材一等奖;第6版被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材、普通高等教育国家级精品教材。

《通信原理(第7版)》是在第6版的基础上,为了适应当前通信技术和教学需求,并吸取了数十所院校教师的反馈意见修订而成。《通信原理(第7版)》的修订着眼于以下几点:

- (1) 加强基本理论、核心内容 and 应用背景的阐述。
- (2) 建立通信系统整体概念,加强理论与实际的联系。
- (3) 加强有关章节之间的融合与贯通。例如,将第6章数字基带系统中的功率谱、抗噪声性能、频带利用率的分析结果引用到第7章数字调制系统,不仅简化了推导过程,还使不同章节之间的相关内容有了更好的衔接和对比。
- (4) 公式推导删繁就简。采用简洁阐述或借用对比的写法替代不必要的繁琐推导过程。
- (5) 改进图表曲线绘制;更好地统一名词和符号。
- (6) 增添信源编码内容,删除通信网全章,调整个别章节顺序。
- (7) 增添部分例题,用以示范解决问题的思路与方法、加深对重点或难点内容的理解。
- (8) 更改部分习题,使其更具综合性、多样性、对比性和应用性。

(9) 附录中增加常用数学公式,方便演算习题。

本书共13章,分为三部分。第一部分(第1章~第5章)阐述通信基础知识和模拟调制原理。第二部分(第6章~第10章)主要论述数字通信、数字信号最佳接收和模拟信号数字化的原理。第三部分(第11章~第13章)讨论数字通信中的编码和同步技术。

对于大学本科教学,本教材的基本教学时数为60学时。对于具有相关数理基础的研究生,基本教学时数为46学时。为了满足一些教学单位的需要,本书内容可以满足更多学时(如90学时)的教学。书中第2章确知信号和第3章随机过程,对于已经具有这些基础知识的学生,视情况可以略过不讲,或作为复习性讲述。对于教学时数较紧的教学计划,可以优先略去8.3节、10.9节至10.12节、第11章和第12章。

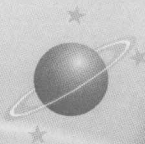
与本教材配套的《通信原理(第7版)学习辅导与考研指导》(含习题全部解答)及电子课件,将由国防工业出版社与本书同步出版发行,选用《通信原理(第7版)》教材的学校,其任课教师可以和本书责任编辑王华编审联系,免费获取电子课件(电话:010-88540615; E-mail: wanghua6956@163.com),来信请务必写明学校名称、教师姓名、通信地址、联系电话、学生数量及课时数。

自《通信原理(第6版)》出版以来,国防工业出版社和西安电子科技大学,联合有关单位先后在不同地区举办了5届“通信原理教学研讨会”,共约80余所院校的教师出席了会议。与会教师在会上互相交流了教学经验,并对此教材提出了许多宝贵的意见和建议。对此,谨向各位出席会议的兄弟院校教师致以衷心的感谢,并恳切欢迎读者对书中的缺点和错误继续给予指正。敬请读者来信时注明真实姓名、单位、职务、电话和通信地址;学生请给出院系和班级及任课老师姓名,以方便交流和联系。

编者的联系地址:曹丽娜:cclna@sohu.com;樊昌信:chxfan@xidian.edu.cn。

编者

2012年10月



目录

4E
4E
0E
第1章 绪论 1			
7E	1.1	通信的基本概念	1
8E	1.1.1	通信的发展	1
9E	1.1.2	消息、信息与信号	2
0E	1.2	通信系统模型	3
04	1.2.1	通信系统一般模型	3
54	1.2.2	模拟通信系统模型	4
45	1.2.3	数字通信系统模型	4
44	1.2.4	数字通信的特点	6
44	1.3	通信系统分类与通信方式	6
74	1.3.1	通信系统的分类	6
74	1.3.2	通信方式	9
74	1.4	信息及其度量	10
49	1.5	通信系统主要性能指标	13
0E	1.5.1	有效性	13
5E	1.5.2	可靠性	14
8E	1.6	小结	14
0E		思考题	15
9E		习题	15
第2章 确知信号 17			
10	2.1	确知信号的类型	17
60	2.2	确知信号的频域性质	18
60	2.2.1	功率信号的频谱	18
80	2.2.2	能量信号的频谱密度	22

2.2.3	能量信号的能量谱密度	26
2.2.4	功率信号的功率谱密度	27
2.3	确知信号的时域性质	29
2.3.1	能量信号的自相关函数	29
2.3.2	功率信号的自相关函数	30
2.3.3	能量信号的互相关函数	32
2.3.4	功率信号的互相关函数	32
2.4	小结	33
	思考题	34
	习题	34
第3章 随机过程		36
3.1	随机过程的基本概念	36
3.1.1	随机过程的分布函数	37
3.1.2	随机过程的数字特征	38
3.2	平稳随机过程	39
3.2.1	定义	39
3.2.2	各态历经性	40
3.2.3	平稳过程的自相关函数	42
3.2.4	平稳过程的功率谱密度	42
3.3	高斯随机过程	44
3.3.1	定义	44
3.3.2	重要性质	45
3.3.3	高斯随机变量	45
3.4	平稳随机过程通过线性系统	47
3.5	窄带随机过程	49
3.5.1	$\xi_c(t)$ 和 $\xi_s(t)$ 的统计特性	50
3.5.2	$a_\xi(t)$ 和 $\varphi_\xi(t)$ 的统计特性	52
3.6	正弦波加窄带高斯噪声	53
3.7	高斯白噪声和带限白噪声	56
3.8	小结	59
	思考题	60
	习题	61
第4章 信道		63
4.1	无线信道	63
4.2	有线信道	68

4.3	信道的数学模型	71
4.3.1	调制信道模型	71
4.3.2	编码信道模型	72
4.4	信道特性对信号传输的影响	73
4.5	信道中的噪声	77
4.6	信道容量	79
4.6.1	离散信道容量	79
4.6.2	连续信道容量	81
4.7	小结	83
	思考题	84
	习题	84
第5章 模拟调制系统		86
5.1	幅度调制(线性调制)原理	86
5.1.1	调幅	87
5.1.2	双边带调制	89
5.1.3	单边带调制	90
5.1.4	残留边带调制	93
5.1.5	线性调制的一般模型	94
5.1.6	相干解调与包络检波	95
5.2	线性调制系统的抗噪声性能	97
5.2.1	分析模型	97
5.2.2	DSB 调制系统的性能	98
5.2.3	SSB 调制系统的性能	100
5.2.4	AM 包络检波的性能	101
5.3	非线性调制(角度调制)原理	104
5.3.1	角度调制的基本概念	104
5.3.2	窄带调频	106
5.3.3	宽带调频	109
5.3.4	调频信号的产生与解调	111
5.4	调频系统的抗噪声性能	116
5.4.1	输入信噪比	116
5.4.2	大信噪比时的解调增益	116
5.4.3	小信噪比时的门限效应	120
5.4.4	预加重和去加重	121
5.5	各种模拟调制系统的比较	122

17	5.6	频分复用	124
17	5.7	小结	125
27		思考题	126
27		习题	127
第6章 数字基带传输系统			130
27	6.1	数字基带信号及其频谱特性	130
27	6.1.1	数字基带信号	131
18	6.1.2	基带信号的频谱特性	132
28	6.2	基带传输的常用码型	139
48	6.2.1	传输码的码型选择原则	139
48	6.2.2	几种常用的传输码型	139
28	6.3	数字基带信号传输与码间串扰	142
28	6.3.1	数字基带信号传输系统的组成	142
78	6.3.2	数字基带信号传输的定量分析	144
28	6.4	无码间串扰的基带传输特性	145
28	6.4.1	消除码间串扰的基本思想	145
28	6.4.2	无码间串扰的条件	146
42	6.4.3	无码间串扰传输特性的设计	148
28	6.5	基带传输系统的抗噪声性能	150
72	6.5.1	二进制双极性基带系统	151
72	6.5.2	二进制单极性基带系统	153
28	6.6	眼图	153
00	6.7	部分响应和时域均衡	155
101	6.7.1	部分响应系统	155
401	6.7.2	时域均衡	161
40	6.8	小结	170
001		思考题	171
201		习题	171
第7章 数字带通传输系统			176
21	7.1	二进制数字调制原理	177
211	7.1.1	二进制振幅键控	177
211	7.1.2	二进制频移键控	179
131	7.1.3	二进制相移键控	183
151	7.1.4	二进制差分相移键控	186
25	7.2	二进制数字调制系统的抗噪声性能	189

7.2.1	2ASK 系统的抗噪声性能	189
7.2.2	2FSK 系统的抗噪声性能	195
7.2.3	2PSK 和 2DPSK 系统的抗噪声性能	199
7.3	二进制数字调制系统的性能比较	204
7.4	多进制数字调制原理	206
7.4.1	多进制振幅键控	207
7.4.2	多进制频移键控	208
7.4.3	多进制相移键控	209
7.4.4	多进制差分相移键控	213
7.5	多进制数字调制系统的抗噪声性能	215
7.5.1	MASK 系统的抗噪声性能	215
7.5.2	MFSK 系统的抗噪声性能	218
7.5.3	MPSK 系统的抗噪声性能	221
7.5.4	MDPSK 系统的抗噪声性能	222
7.6	小结	223
	思考题	224
	习题	225
第 8 章 新型数字带通调制技术		228
8.1	正交振幅调制	228
8.2	最小频移键控和高斯最小频移键控	231
8.2.1	正交 2FSK 信号的最小频率间隔	231
8.2.2	MSK 信号的基本原理	232
8.2.3	MSK 信号的产生和解调	236
8.2.4	MSK 信号的功率谱	239
8.2.5	MSK 信号的误码率性能	240
8.2.6	高斯最小频移键控	241
8.3	正交频分复用	242
8.3.1	概述	242
8.3.2	OFDM 的基本原理	243
8.3.3	OFDM 的实现	245
8.4	小结	248
	思考题	248
	习题	248
第 9 章 数字信号的最佳接收		250
9.1	数字信号的统计特性	250

9.2	数字信号的最佳接收	252
9.3	确知数字信号的最佳接收机	254
9.4	确知数字信号最佳接收的误码率	256
9.5	随相数字信号的最佳接收	260
9.6	起伏数字信号的最佳接收	262
9.7	实际接收机和最佳接收机的性能比较	263
9.8	数字信号的匹配滤波接收法	264
9.9	最佳基带传输系统	271
9.9.1	理想信道的最佳基带传输系统	271
9.9.2	非理想信道的最佳基带传输系统	274
9.10	小结	275
	思考题	276
	习题	276
第10章	信源编码	279
10.1	引言	279
10.2	模拟信号的抽样	280
10.2.1	低通模拟信号的抽样定理	280
10.2.2	带通模拟信号的抽样定理	283
10.3	模拟脉冲调制	284
10.4	抽样信号的量化	286
10.4.1	量化原理	286
10.4.2	均匀量化	287
10.4.3	非均匀量化	289
10.5	脉冲编码调制	295
10.5.1	脉冲编码调制的基本原理	295
10.5.2	常用二进制码	296
10.5.3	电话信号的编译码器	298
10.5.4	PCM系统中噪声的影响	301
10.6	差分脉冲编码调制	302
10.6.1	预测编码简介	302
10.6.2	差分脉冲编码调制原理及性能	304
10.7	增量调制	305
10.7.1	增量调制原理	305
10.7.2	增量调制系统中的量化噪声	306
10.8	时分复用	308

078	10.8.1	基本概念	308
078	10.8.2	准同步数字体系	309
078	10.9	矢量量化	312
078	10.10	语音压缩编码	314
078	10.11	图像压缩编码	317
078	10.11.1	静止图像压缩编码	317
078	10.11.2	动态图像压缩编码	320
078	10.12	数字数据压缩编码	321
078	10.12.1	基本原理	321
078	10.12.2	霍夫曼编码	322
078	10.13	小结	325
078		思考题	326
078		习题	327
第11章 差错控制编码			331
078	11.1	概述	331
078	11.2	纠错编码的基本原理	334
078	11.3	纠错编码的性能	337
078	11.4	简单的实用编码	337
078	11.4.1	奇偶监督码	337
078	11.4.2	二维奇偶监督码	338
078	11.4.3	恒比码	338
078	11.4.4	正反码	339
078	11.5	线性分组码	339
078	11.6	循环码	344
078	11.6.1	循环码原理	344
078	11.6.2	循环码的编解码方法	349
078	11.6.3	截短循环码	352
078	11.6.4	BCH 码	352
078	11.6.5	RS 码	354
078	11.7	卷积码	354
078	11.7.1	卷积码的基本原理	355
078	11.7.2	卷积码的代数表述	356
078	11.7.3	卷积码的解码	360
078	11.8	Turbo 码	366
078	11.9	低密度奇偶校验码	369

11.10	网格编码调制	370
11.10.1	网格编码调制的基本概念	370
11.10.2	TCM 信号的产生	370
11.10.3	TCM 信号的解调	372
11.11	小结	374
	思考题	375
	习题	376
第 12 章 正交编码与伪随机序列		379
12.1	正交编码	379
12.1.1	正交编码的基本概念	379
12.1.2	阿达玛矩阵	381
12.1.3	沃尔什函数和沃尔什矩阵	383
12.2	伪随机序列	384
12.2.1	基本概念	384
12.2.2	m 序列	384
12.2.3	其他伪随机序列简介	395
12.3	扩展频谱通信	399
12.4	伪随机序列的其他应用	401
12.5	小结	407
	思考题	407
	习题	408
第 13 章 同步原理		410
13.1	概述	410
13.2	载波同步	411
13.2.1	有辅助导频时的载频提取	411
13.2.2	无辅助导频时的载波提取	412
13.2.3	载波同步的性能	415
13.3	码元同步	418
13.3.1	外同步法	418
13.3.2	自同步法	419
13.3.3	码元同步误差对于误码率的影响	421
13.4	群同步	422
13.4.1	概述	422
13.4.2	集中插入法	423
13.4.3	分散插入法	425

13.4.4	群同步性能	427
13.4.5	起止式同步	428
13.4.6	自群同步	429
13.4.7	扩谱通信系统的同步	429
13.5	网同步	433
13.5.1	概述	433
13.5.2	开环法	435
13.5.3	闭环法	436
13.6	小结	438
	思考题	439
	习题	440
附录 A	巴塞伐尔定理	441
附录 B	误差函数值表	443
附录 C	贝塞尔函数值表	446
附录 D	式(7.5-18)和式(7.5-20)的推导	447
附录 E	A 律的推导	449
附录 F	式(9.4-1)的计算	451
附录 G	式(9.5-7)的推导	453
附录 H	伽罗华域 $GF(2^m)$	455
附录 I	英文缩写名词对照表	456
附录 J	常用数学公式	461
附录 K	部分习题答案	463

01

第1章 绪论

通信系统由发信设备和收信设备组成。发信设备包括信源、信道编码、调制器等。收信设备包括解调器、信道解码、信宿等。通信系统的主要性能指标有传输速率、误码率、带宽利用率等。

通信(communication)按照一般的理解就是传输信息。在当今高度信息化的时代,信息和通信已成为现代社会的“命脉”。信息作为一种资源,只有通过广泛地传播、交流与共享,才能产生利用价值,而通信作为传输信息的手段,伴随着计算机技术、传感技术和微电子等技术,正在和已经向着数字化、智能化、高速化、宽带化、综合化、移动与个人化等方向飞速发展。可以预见,未来的通信必将对人们的生活方式、经济发展、政治、军事等方面,产生更加重大和深远的影响。

本书讨论的主要内容就是如何有效而可靠地传输信息。为了使读者在学习各章内容之前,对通信和通信系统有一个初步的了解与认识,本章将概括地介绍通信的基本概念和术语,通信系统的组成、分类和通信方式,信息的度量以及评价通信系统性能的目标。

1.1 通信的基本概念

1.1.1 通信的发展

通信是发送者(人或机器)和接收者之间通过某种媒体进行的信息传递。实现通信的手段有很多,例如,古战场上通过鸣金和击鼓传递作战命令,利用烽火台传递敌情;以及现代社会的电报、电话、广播、电视和计算机通信等。

电信(telecommunication)是利用电信号来传输信息的通信方式。1837年莫尔斯发明的有线电报开创了电信的新时代;1876年贝尔发明的电话已成为我们日常生活中通信的主要工具;1918年调幅无线电广播问世;1936年商业电视广播开播;1983年蜂窝状移动通信网(蜂窝网)首先在美国投入商业使用;1987年11月在我国广州也开通了蜂窝网;1983年,美国国防部将阿帕网(ARPANET)分为军网和民网,后者逐渐发展为今天的因特网。100多年来,电信技术伴随着社会需求和科技进步得到了迅猛发展和广泛应用。如今,“通信”这一术语一般是指“电信”。广义来讲,光通信也属于电信,因为光也是一种电磁波。本书后面讨论的通信均指电信。

1.1.2 消息、信息与信号

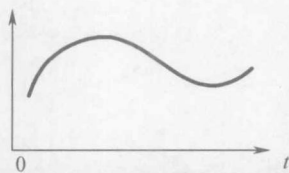
消息(message)在不同的地方有不同的含义。在本书中消息是指通信系统传输的对象,它是信息的载体。例如,语音、音乐、活动图片、文字、符号、数据等。消息可以分成两大类:连续消息和离散消息。连续消息是指消息的状态连续变化或不可数的,如语音、温度数据等。离散消息则是指消息具有可数的有限个状态,例如符号、文字、数字数据等。

信息(information)是消息中所包含的有效内容。信息与消息的关系可以这样理解:消息是信息的物理表现形成,而信息是消息的内涵。例如,播报天气。语音是天气预报的表现形成,而天气情况是语音的内涵。在当今信息社会中,信息已成为最宝贵的资源之一,如何有效而可靠地传输信息是本书研究的主要内容。

信号(signal)是消息的传输载体。在电信系统中,传输的是电信号。为了将各种消息(如一幅图片)通过线路传输,必须首先将消息转变成电信号(如电压、电流、电磁波等),也就是把消息载荷在电信号的某个参量(如正弦波的幅度、频率或相位;脉冲波的幅度、宽度或位置)上。由于消息可以分为两大类,所以信号也相应分为两大类:模拟信号和数字信号。

模拟信号(analog signal)——载荷消息的信号参量取值是连续(不可数、无穷多)的,如电话机送出的语音信号,其电压瞬时值是随时间连续变化的。模拟信号有时也称连续信号,这里连续的含义是指信号载荷的消息的参量连续变化,在某一取值范围内可以取无穷多个值,而不一定在时间上也连续,如图1-1(b)中所示的抽样信号。

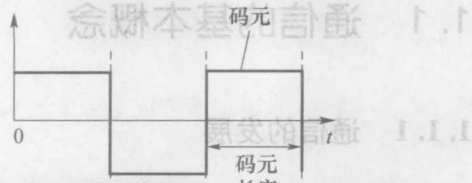
数字信号(digital signal)——载荷消息的信号参量只有有限个取值,如电报机、计算机输出的信号。最典型的数字信号是只有两种取值的信号,如图1-2所示。图中码元表示一个符号(数字或字符等)的电波形,它占用一定的时间和带宽。



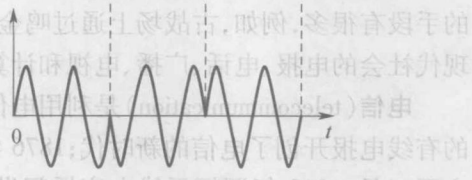
(a) 语音信号



(b) 抽样信号



(a) 二电平信号



(b) 二相位信号

图1-1 模拟信号

图1-2 数字信号

消息与电信号之间的转换通常由各种传感器来实现。例如,话筒(声音传感器)把声波转变成音频电信号;摄像机把图像转变成视频电信号;热敏电阻(温度传感器)把温度转变成电信号等。