

大数据、云计算、人工智能、信息安全人才培养丛书
“互联网+”新形态一体化教材

现代通信原理

XIANDAI TONGXIN YUANLI

主 编◎江晓林 韩 天



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书讲述通信的基本原理, 主要内容包括模拟通信和数字通信, 更侧重于数字通信。全书共分 12 章, 包括绪论、确定信号分析、随机信号分析、模拟信息传输、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、信源及信源编码、信道及其复用技术、信道编码、同步原理、现代通信网。针对特定的知识点, 第 2 章到第 11 章还设置了对应的 MATLAB 源程序及仿真分析, 帮助学生加深对该部分知识的理解, 掌握 MATLAB 在通信系统中的应用, 可为后续专业学习打下坚实基础。各章后面还备有相关习题。

本书语言简练、通俗易懂, 可作为高等学校工科无线电技术、电子信息、通信工程等相关专业的教学用书, 也可作为相关技术人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代通信原理/江晓林, 韩天主编. — 上海: 上海交通大学出版社, 2023. 8

ISBN 978-7-313-27999-6

I. ①现… II. ①江… ②韩… III. ①通信原理
IV. ①TN911

中国国家版本馆 CIP 数据核字 (2023) 第 037726 号

现代通信原理

XIANDAI TONGXIN YUANLI

主 编: 江晓林 韩 天	地 址: 上海市番禺路 951 号
出版发行: 上海交通大学出版社	电 话: 6407 1208
邮政编码: 200030	
印 制: 北京荣玉印刷有限公司	经 销: 全国新华书店
开 本: 889mm×1194mm 1/16	印 张: 20
字 数: 593 千字	
版 次: 2023 年 8 月第 1 版	印 次: 2023 年 8 月第 1 次印刷
书 号: 978-7-313-27999-6	
定 价: 62.00 元	

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 010-6020 6144



通信新技术正在悄悄地改变我们的生活。从 2G、3G 到 4G，再到现在的 5G、未来的 6G；从铜线上网到现在的极速光宽带；无处不在的免费 Wi-Fi、智慧停车、智慧医疗、智慧居家等。人与智能终端的交互方式将会变得更加自然，通信设备将会变得越来越智能。通信技术的发展日新月异。

掌握现代通信原理的重要性不言而喻。学习通信专业知识的学生和从业人员首先需要掌握扎实的基础理论，本书的编写宗旨就是系统深入地阐述现代通信系统的基本原理，主要包括模拟通信和数字通信，并以数字通信为主。本书力求把基本概念阐述透彻，并注重理论联系实际。为帮助读者掌握基本的分析方法，书中列举了许多例题，并设置了对应的 MATLAB 仿真实践，各章末尾还附有思考题与练习题。本书提供完整的配套资源，包括 PPT 课件、习题参考答案、所有 MATLAB 程序案例源码等，有需要者可致电 13810412048 或发邮件至 2393867076@qq.com 领取。

全书共 12 章。

第 1 章为绪论，介绍通信的发展过程、通信系统的组成和分类、通信系统中的主要指标及信息量的度量。

第 2 章为确定信号分析，主要介绍几种重要的信号、周期信号与非周期信号频谱、卷积、相关函数、信号的能量谱与功率谱分析。

第 3 章为随机信号分析，包括随机过程的基本概念及数字特征、平稳随机过程判定及其功率谱分析、高斯随机过程与高斯白噪声、窄带高斯噪声的统计特性分析。

第 4 章为模拟信息传输，介绍了线性调制和非线性调制原理，给出了一般模型，分析了线性调制系统和非线性调制系统的抗噪声性能，最后对常用的模拟信息线性调制系统和非线性调制系统的性能进行了综合比较。

第 5 章为模拟信号的数字传输，阐述了低通抽样定理、带通抽样定理、模拟信号的均匀量化及非均匀量化的基本原理，介绍了脉冲编码调制(PCM)、差分脉冲编码调制(DPCM)、增量调制(ΔM)的工作原理及相关性能。

第 6 章为数字信号的基带传输，阐述了数字基带信号常用码型、基带信号的频谱分析、传输过程中的误码分析，最后介绍了眼图和均衡技术。

第 7 章为数字信号的频带传输，阐述了数字频带信号的特点。以二进制数字调制系统为主，论述了二进制数字调制的原理和方法，分析了二进制数字调制系统的抗噪声性能，介绍了多进制数字调制的原理。

第 8 章为信源及信源编码，讨论了信源的分类及统计特性、信息熵及互信息量的求解过程，重点分析了无失真信源编码与限失真信源编码的原理。

第 9 章为信道及其复用技术，介绍了信道的定义、数学模型和传输特性，分析了信道容量，重点介绍了信道复用技术，最后介绍了伪随机序列。

第 10 章为信道编码，介绍了信道编码实现差错控制的机理及常用检错码、纠错码，重点分析了线性分组码、循环码和卷积码的基本原理及解码方法。

第 11 章为同步原理，讨论了载波同步、位同步、群同步的原理和技术。

第 12 章为现代通信网，介绍了现代通信网的组成及其发展趋势，并对下一代网络进行了分析和展望。

本书的特点是系统性强，内容编排连贯，突出基本概念、基本原理；注意吸收新技术和新的通信系统；注重知识的归纳与总结；强调理论与实践相结合，针对不同的知识点设置对应的 MATLAB 实践，帮

助学生理解相关知识。同时，本书落实立德树人根本任务，贯彻《高等学校课程思政建设指导纲要》和党的二十大精神，通过设置趣味小课堂模块，将专业知识与思政教育有机结合，推动价值引领、知识传授和能力培养紧密结合。

本书语言简练、通俗易懂，可作为工科无线电技术、电子信息、通信工程等相关专业的教学用书，也可作为相关技术人员的参考用书。

编 者
2023 年 3 月



目录



第1章 绪论/1

1.1 通信系统的基本模型	2	1.3.2 通信方式	8
1.1.1 模拟通信系统	2	1.4 通信系统的主要性能指标	9
1.1.2 数字通信系统	3	1.4.1 衡量通信系统好坏的两个标准	9
1.2 通信发展历程	4	1.4.2 评价两个指标的重要参量	9
1.3 通信系统的分类及通信方式	7	1.5 信息量度量	11
1.3.1 通信系统的分类	7	思考与练习	13



第2章 确定信号分析/15

2.1 重要确定信号简介	16	2.2.3 能量谱密度与功率谱密度	20
2.1.1 单位斜坡信号	16	2.3 确定信号的卷积与相关函数	21
2.1.2 单位阶跃信号	16	2.3.1 卷积与卷积定理	21
2.1.3 单位冲激信号	16	2.3.2 信号的相关函数	22
2.2 信号的频谱分析	17	2.4 MATLAB 实践	23
2.2.1 周期信号的频谱分析	17	思考与练习	26
2.2.2 非周期信号的频谱分析	18		



第3章 随机信号分析/28

3.1 随机过程的基本概念与概率分布	29	3.4.1 平稳随机过程通过线性系统	35
3.1.1 随机过程的基本概念	29	3.4.2 平稳随机过程通过乘法器	37
3.1.2 随机过程的概率分布	29	3.5 高斯随机过程与高斯白噪声	38
3.2 随机过程的数字特征	30	3.5.1 高斯随机变量与高斯随机过程	38
3.2.1 数学期望	30	3.5.2 高斯随机过程的性质	38
3.2.2 均方值和方差	30	3.5.3 高斯白噪声与带限白噪声	39
3.2.3 自相关函数与自协方差	31	3.6 窄带高斯噪声	40
3.2.4 互协方差与互相关函数	31	3.6.1 窄带高斯噪声的定义和表达方式	40
3.3 平稳随机过程	32	3.6.2 同相分量和正交分量的统计特性	41
3.3.1 平稳随机过程的定义	32	3.6.3 包络和相位的统计特性	42
3.3.2 相关函数及各态历经性	32	3.6.4 余弦波加窄带高斯噪声	43
3.3.3 平稳随机过程的功率谱密度	34	3.7 MATLAB 实践	45
3.4 随机过程通过系统分析	35	思考与练习	47



第4章 模拟信息传输/49

4.1 调制的目的及分类	49	4.3.1 角度调制的基本概念	65
4.1.1 调制的目的	49	4.3.2 窄带调频	66
4.1.2 调制的分类	50	4.3.3 宽带调频	67
4.2 线性调制	50	4.3.4 调频信号的产生与解调	69
4.2.1 幅度调制	51	4.3.5 调频系统的抗噪声性能	73
4.2.2 抑制载波双边带调制	52	4.4 模拟调制系统的比较	78
4.2.3 单边带调制	53	4.4.1 有效性及可靠性比较	78
4.2.4 残留边带调制	55	4.4.2 抗噪声性能比较	79
4.2.5 线性调制的一般原理	57	4.4.3 频带利用率比较	79
4.2.6 线性调制信号的解调	57	4.5 MATLAB 实践	79
4.2.7 线性调制系统的抗噪声性能	59	思考与练习	84
4.3 非线性调制	64		



第5章 模拟信号的数字传输/87

5.1 抽样定理	88	5.4.2 逐次比较型编译码原理	101
5.1.1 低通抽样定理	88	5.4.3 PCM 信号的码元速率和带宽	103
5.1.2 带通抽样定理	90	5.4.4 PCM 系统的抗噪声性能	104
5.2 脉冲幅度调制	90	5.5 差分脉冲编码调制	105
5.3 模拟信号的量化	93	5.6 增量调制	106
5.3.1 量化原理	93	5.6.1 增量调制原理	107
5.3.2 均匀量化	93	5.6.2 增量调制系统中的量化噪声	109
5.3.3 非均匀量化	95	5.6.3 PCM 系统与 ΔM 系统比较	111
5.4 脉冲编码调制	99	5.7 MATLAB 实践	112
5.4.1 脉冲编码调制的基本原理	99	思考与练习	115



第6章 数字信号的基带传输/118

6.1 数字基带信号	119	6.4 数字基带传输中的误码分析	127
6.2 数字基带信号的码型	119	6.4.1 产生误码的因素	127
6.2.1 数字基带信号的码型设计原则	119	6.4.2 码间串扰的消除方法	128
6.2.2 数字基带信号的常见码型	120	6.4.3 基带系统的噪声分析	133
6.2.3 数字基带信号的传输码型	121	6.5 眼图	135
6.3 基带信号的频谱分析	123	6.6 均衡	136
6.3.1 $v(t)$ 的功率谱密度 $P_v(f)$	125	6.7 MATLAB 实践	139
6.3.2 $u(t)$ 的功率谱密度 $P_u(f)$	125	思考与练习	143
6.3.3 $s(t) = u(t) + v(t)$ 的功率谱密度 $P_s(f)$	127		



第7章 数字信号的频带传输/145

7.1 数字频带信号	145	7.3.2 2FSK 系统的抗噪声性能	159
7.2 数字调制原理	146	7.3.3 2PSK 和 2DPSK 系统的抗噪声性能	162
7.2.1 二进制幅度键控	146	7.4 多进制数字调制系统	164
7.2.2 二进制频率键控	148	7.4.1 多进制数字幅度调制系统	164
7.2.3 二进制相位键控	151	7.4.2 多进制数字频率调制系统	166
7.2.4 二进制差分相位键控	152	7.4.3 多进制数字相位调制系统	167
7.3 二进制数字调制系统的抗噪声性能	155	7.5 MATLAB 实践	168
7.3.1 2ASK 系统的抗噪声性能	155	思考与练习	172



第8章 信源及信源编码/174

8.1 信源的分类及统计特性	174	8.4.1 信息率失真函数	189
8.1.1 信源的分类	174	8.4.2 限失真信源编码定理	192
8.1.2 信源的统计特性模型	176	8.5 相关信源的限失真编码	193
8.2 信息熵及互信息量	177	8.5.1 预测编码	193
8.3 无失真信源编码	180	8.5.2 变换编码	196
8.3.1 无失真信源编码原理	180	8.6 MATLAB 实践	200
8.3.2 几种无失真信源编码	185	思考与练习	206
8.4 限失真信源编码	189		



第9章 信道及其复用技术/207

9.1 信道的定义及分类	207	9.4 信道容量	215
9.1.1 狭义信道	208	9.5 信道复用技术	216
9.1.2 广义信道	209	9.5.1 频分多路复用	216
9.2 信道的数学模型	210	9.5.2 时分多路复用	217
9.2.1 调制信道模型	210	9.5.3 码分多路复用	218
9.2.2 编码信道模型	210	9.6 伪随机序列	219
9.3 信道的特性	211	9.6.1 伪随机序列的定义	219
9.3.1 恒参信道传输特性	211	9.6.2 m 序列的产生	219
9.3.2 随参信道传输特性	213	9.7 MATLAB 实践	220
9.3.3 频率选择性衰落与相关带宽	214	思考与练习	226



第10章 信道编码/227

10.1 纠错编码概述	227	10.3.1 奇偶校验码	230
10.1.1 差错分类	228	10.3.2 行列监督码	231
10.1.2 差错控制方式	228	10.3.3 定比码	232
10.1.3 纠错码的分类	229	10.4 线性分组码	232
10.2 纠错编码的基本原理	229	10.5 循环码	236
10.2.1 基本概念	229	10.5.1 循环码的描述	236
10.2.2 检错和纠错的基本原理	229	10.5.2 校验子与循环码的编码、译码原理	239
10.3 检错码	230	10.5.3 译码方法和电路	240

10.6 卷积码	242	10.7 MATLAB 实践	246
10.6.1 卷积码的基本原理	242	思考与练习	249
10.6.2 卷积码的解码	245		



第 11 章 同步原理/251

11.1 同步及其分类	252	11.3.3 位同步的性能对解调的影响	264
11.1.1 同步的基本概念	252	11.4 群同步的方法与性能	264
11.1.2 同步的分类	252	11.4.1 群同步的方法	265
11.2 载波同步的方法与性能	253	11.4.2 群同步的性能	267
11.2.1 载波同步的方法	253	11.5 网同步	268
11.2.2 载波同步的性能	258	11.5.1 同步网	268
11.2.3 载波同步性能对解调的影响	260	11.5.2 异步网	269
11.3 位同步的方法与性能	260	11.6 MATLAB 实践	269
11.3.1 位同步的方法	260	思考与练习	274
11.3.2 位同步的性能	262		



第 12 章 现代通信网/275

12.1 现代通信网概述	275	12.5.1 计算机通信网的基本概念	293
12.1.1 现代通信网的构成	275	12.5.2 计算机通信网的基本功能	293
12.1.2 现代通信网的特征	277	12.5.3 计算机通信网的组成	294
12.1.3 现代通信网的交换技术	277	12.5.4 计算机通信网的分类	294
12.1.4 现代通信网的分类	278	12.6 宽带综合业务数字网	295
12.2 电话通信网	278	12.6.1 宽带综合业务数字网概述	295
12.2.1 电话通信网简介	278	12.6.2 宽带综合业务数字网的分类	296
12.2.2 PSTN 的网络结构	279	12.6.3 宽带综合业务数字网的特点	296
12.2.3 长途电话网	280	12.6.4 宽带综合业务数字网的关键技术	297
12.2.4 本地电话网	281	12.7 下一代网络与软交换	297
12.2.5 路由基础	282	12.7.1 下一代网络概述	297
12.3 移动通信网	285	12.7.2 下一代网络的特点	298
12.3.1 移动通信网简介	285	12.7.3 下一代网络的关键技术	298
12.3.2 移动通信网的组成	286	12.7.4 软交换概述	300
12.3.3 移动通信的特点	287	12.7.5 软交换设备	300
12.4 数据通信网	288	12.7.6 软交换的主要协议	302
12.4.1 数据通信网概述	288	12.8 现代通信网络的发展趋势	303
12.4.2 数据通信网的分类	288	12.8.1 现有技术对通信网络的支撑	303
12.4.3 数据通信系统的组成	290	12.8.2 三网合一	304
12.4.4 传统数据通信网	290	12.8.3 超宽带技术	304
12.4.5 现代数据通信网	291	12.8.4 第五代移动通信技术	304
12.4.6 数据通信网的运行维护管理	291	思考与练习	308
12.5 计算机通信网	292		



参考文献/309

第 1 章

绪 论

本章导读

21 世纪以来,信息科学技术迅猛发展,在社会各个领域得到了越来越广泛的应用。信息技术快速发展的动因和显著特点是计算机技术和信息通信技术的快速发展以及计算机网络与通信网的相互融合,使得因特网迅速发展,遍及世界各地,延伸到各个角落,并从有线扩展到无线,延伸到人的手中。在现代通信系统中,数字通信的发展异常迅速。数字通信是计算机和通信这两种技术相互渗透、有机结合的产物。国外期刊中经常出现“communication”一词,它是由“computer”与“communication”两词结合而成的。通信的目的就是互通信息,是由一个地方向另一地方进行信息的有效传递。从本质上讲,通信就是实现信息传递功能的一门科学技术。它将大量有用的信息无失真、高效率地进行传输,在传输过程中又将无用信息和有害信息剔除掉。通信不仅要能有效地传递信息,还要有存储、处理、采集和显示等功能。从原始社会到现代文明社会,人类社会的各种活动都与通信密切相关,特别是当今世界已进入信息时代,通信已渗透到社会各个领域,通信产品随处可见。通信已成为现代文明的标志之一,对人们日常生活和社会活动及发展都将起到更加重要的作用。

本书讨论的内容主要是现代通信的具体实现过程及其中一些关键的通信技术。本章将从通信系统基本模型出发,阐述通信系统中的基本概念和术语、通信的发展历程、通信方式,以及评价通信系统的一些性能指标。

学习目标

知识与技能目标

- ① 了解通信的基本模型及通信发展的历史。
- ② 认识通信的基本概念,掌握通信系统的分类。
- ③ 掌握信息量的度量方法。
- ④ 掌握判定通信系统好坏的重要参量,学会分析评定通信系统好坏的重要方法。

素质目标

- ① 掌握常规模拟与数字通信系统的理论知识,培养初步分析能力与基础设计技能。
- ② 激发对通信系统分析的兴趣,培养工程与系统分析能力。

1.1 通信系统的基本模型

通信的任务是完成消息的传递和交换。以点对点通信为例，可以看出要实现消息从一地向另一地的传递，必须有三个部分：一是发送端，二是接收端，三是收发两端之间的信道，如图 1.1 所示。

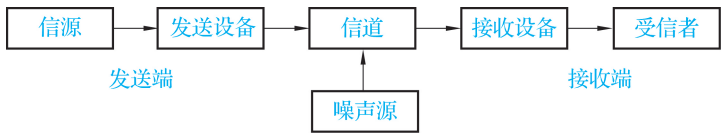


图 1.1 通信系统的组成

- 信源(也称发终端)：作用是把各种消息转换成原始信号。
- 发送设备：为了使这个原始信号适合在信道中传输，由发送设备对原始信号完成某种变换，然后送入信道。
- 信道：信号传输的通道。
- 接收设备：其功能与发送设备相反，它能将接收的信号恢复成相应的原始信号。
- 受信者(也称信宿或收终端)：将复原的原始信号转换成相应的消息。
- 噪声源：信道中的噪声及分散在通信系统其他各处的噪声的集中表示，这并非指通信中一定要有一个噪声源，而是为了在分析和讨论问题时便于理解而人为设置的。

根据消息的传输形式，可以将消息分成连续消息(模拟消息)和离散消息(数字消息)。连续消息是指状态连续变化的消息，如连续变化的语音、图像等；离散消息是指状态是可数的或是离散的消息，如符号、文字或数据等。

根据基本模型，可以知道要进行消息的传递，就需要进行信号形式的转换。在电话通信中，将消息转变为电信号，这样消息与电信号之间就存在单一的对应关系。消息被载荷在电信号的某一参量上，如果电信号的该参量是离散取值的，则称这样的信号为数字信号；如果电信号的该参量是连续取值的，则称这样的信号为模拟信号。

按照信道中传输的信号类型(模拟信号或数字信号)，把通信系统分成两类：模拟通信系统和数字通信系统。模拟通信系统又分为模拟基带传输通信系统和模拟频带传输通信系统，数字通信系统也可以分为数字基带传输通信系统和数字频带传输通信系统。基带传输通信系统是在传输过程中对发送的信号未进行调制的通信系统；频带传输通信系统是在传输过程中，对发送的信号进行了频谱搬移的通信系统，这样做有利于信息的传输。

1.1.1 模拟通信系统

信道中传输模拟信号的系统称为模拟通信系统。模拟通信系统的模型(通常也简称为模型)可由一般通信系统模型略加改变而成，如图 1.2 所示。

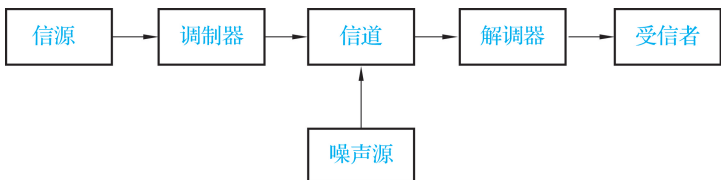


图 1.2 模拟通信系统的模型

对于模拟通信系统，它主要包含两种重要变换：把连续消息变换成电信号(发终端完成)和把电信号

恢复成最初的连续消息(收终端完成)。由信源输出的电信号(基带信号)具有频率较低的频谱分量,一般不能直接作为传输信号而传输到信道中去。一般要对传输的信号进行调制,即将基带信号转换成频带适合在信道中传输的信号,这一变换由调制器完成;在接收端同样需经相反的变换,它由解调器完成。经过调制后的信号通常称为已调信号。已调信号有三个基本特性:一是携带有消息,二是适合在信道中传输,三是具有较高频率。

1.1.2 数字通信系统

信道中传输数字信号的系统称为数字通信系统。首先,应该对要求传送的模拟信号进行数字化。数字化分三步:抽样、量化和编码,即 A/D 转换。将编码完成后的信号放到数字通信系统中传输,数模转换器再进行反过程转换,即 D/A 转换,最后到达接收端。模拟信号数字传输通信系统的模型如图 1.3 所示。



图 1.3 模拟信号数字传输通信系统的模型

数字通信的基本特征是它的消息或信号具有“离散”或“数字”的特性,从而使数字通信具有许多特殊的问题。例如,前面提到的第二种变换,在模拟通信中强调变换的线性特性,即强调已调参量与代表消息的模拟信号之间的比例特性;而在数字通信中,则强调已调参量与代表消息的数字信号之间的一一对应关系。

与模拟通信相比,数字通信具有以下优点。

- (1) 数字传输抗干扰能力强,尤其是在中继时,数字信号可以再生并消除噪声的积累;
- (2) 传输差错可以控制,从而改善了传输质量;
- (3) 便于使用现代数字信号处理技术来对数字信号进行处理;
- (4) 数字信号易于做高保密性的加密处理;
- (5) 数字通信可以综合传递各种信号,使通信系统功能增强;
- (6) 输出信噪比随带宽呈指数规律增长。

但是,在数字传输过程中因为数字信号所占用的频带较宽,而频谱资源相对有限,所以如何提高频带利用率是亟须解决的问题。同时,在数字信号传输过程中,要准确地恢复信号,在接收端就需要严格地同步系统,以保持收终端和发终端节拍一致、编组一致。因此,数字通信系统及设备一般都比较复杂,体积较大。随着数字集成技术的发展,各种中、大规模集成器件的体积不断减小,加上数字压缩技术的不断完善,数字通信设备的体积将会越来越小。随着科学技术的不断发展,数字通信的两个缺点也越来越显得不重要。实践表明,数字通信是现代通信的发展方向。

现代通信网中,数字通信系统可进一步细分为数字基带传输通信系统和数字频带传输通信系统。

1. 数字基带传输通信系统

与数字频带传输通信系统相对应,把没有调制器/解调器的数字通信系统称为数字基带传输通信系统,基本模型如图 1.4 所示。其中,基带信号形成器可能包括编码器、加密器和波形变换器等,接收滤波器可能包括译码器、解密器等。

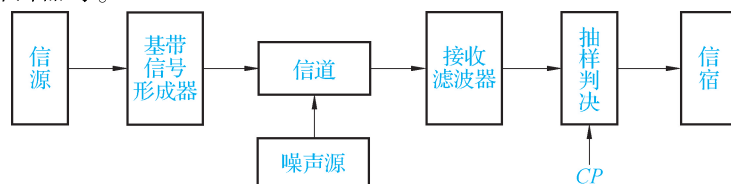


图 1.4 数字基带传输通信系统模型

2. 数字频带传输通信系统

数字频带传输通信系统中的频带传输是指在传输过程中,对数字信号进行调制后再进行传输,基本模型如图 1.5 所示。信源编码和信道编码负责完成对发送的数字信号信息进行加密和差错控制,再通过调制器对加密后的信号进行调制,调制后的信号放在信道中传输。在信道中,噪声的干扰不可避免。在接收端,对接收的信号进行解调、译码、解码,最终到达信宿,从而完成通信的过程。

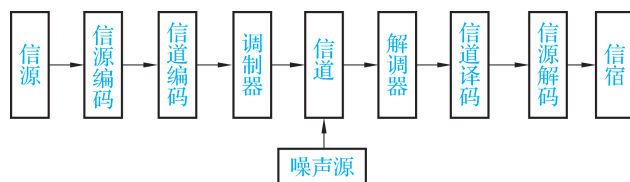


图 1.5 数字频带传输通信系统模型

1.2 通信发展历程

2020 年,科技界最热门的话题莫过于 5G。5G 中的“G”是“generation”的简称,汉语意思为代,5G 就是第 5 代。同样,之前的 1G、2G、2.5G、3G、4G 也都表示第几代的意思。移动通信从 1G 到 5G,走过的历史并不漫长。1G 的主要技术是模拟通信,将声音变为电波,通过电波传输,再还原成声音。这样的方式使其存在品质差、安全性差、易受到干扰等问题。但蜂窝通信、频谱复用等技术,在现代的基站建设方面,也起到了重要的作用。2G 的重要技术是数字通信,将声音信息变成数字编码完成信息传输。这样的方式让通信更加稳定、抗干扰性更强、更安全。3G 在国际电信联盟(ITU)征集第 3 代通信标准,后来由中国、美国和欧洲的一些国家共同制定了 3G 标准,3G 是从数字通信向数据通信转变的开始。4G 缩小了数字鸿沟,中国通过 3G 的积累学习,在 4G 移动互联网时代开始反超,移动电子商务、移动支付等业务不断发展,让 4G 走入千家万户——便宜的智能手机、便捷的支付方式让普通人也进入了网络时代。4G 改变生活,5G 改变社会。5G 技术的应用,使得传统的互联网实现了智能互联,万物互联成为可能。5G 促使数据大爆发,数据中心行业贯穿 5G 发展周期;AI、模式识别等技术将非结构化数据翻译成结构化数据,使通信业界发生了天翻地覆的变化。而在 2022 年,6G 也已经提上日程,6G 即第 6 代移动通信标准,一个概念性无线网络移动通信技术,也称为第 6 代移动通信技术。6G 网络将是一个地面无线网络与卫星通信集成的连接全世界的网络。通过将卫星通信整合到 6G 移动通信,实现全球无缝覆盖。网络信号能够抵达任何一个偏远的乡村,让身处山区的患者能接受远程医疗,让孩子们能接受远程教育。此外,在全球卫星定位系统、电信卫星系统、地球图像卫星系统和 6G 地面网络的联动支持下,地空全覆盖网络还能帮助人类预测天气、快速应对自然灾害等。6G 通信技术的目标不再是简单的网络容量和传输速率的突破,而是变成了缩小数字鸿沟、实现万物互联。

通信技术的快速发展始于 19 世纪中叶,下面来着重探究从 19 世纪中叶至今通信的整体发展历程。

19 世纪中叶前后,随着电报、电话的发明和电磁波的发现,人类通信领域产生了根本性变革,实现了利用金属导线来传递信息,甚至通过电磁波来进行无线通信,使神话中的“顺风耳”“千里眼”变成了现实。从此,人类的信息传递可以脱离常规的视觉、听觉方式,用电信号作为新的载体,同时带来了一系列技术革新,开创了人类通信的新时代。

1837 年,美国人塞缪尔·莫尔斯成功研制出世界上第一台电磁式电报机。1844 年 5 月 24 日,莫尔斯在国会大厦联邦最高法院会议厅用“莫尔斯电码”发出了人类历史上第一份电报,实现了长途电报通信。1875 年,苏格兰青年亚历山大·格拉汉姆·贝尔发明了世界上第一台电话机,并于 1876 年申请了发明专利。1888 年,德国青年物理学家海因里希·鲁道夫·赫兹用电波环进行了一系列实验,发现了电磁波的

存在,他用实验证明了麦克斯韦的电磁理论。这个实验轰动了整个科学界,成为近代科学技术史上的一个重要里程碑,标志着无线电的诞生,推动了电子技术的发展。1894年俄国的波波夫、意大利的马可尼分别发明了无线电接收器和无线电报,实现了信息的无线电传播,其他的无线电技术也如雨后春笋般涌现出来。1906年美国物理学家费森登成功研制出无线电广播。1920年美国无线电专家康拉德在匹兹堡建立了世界上第一家商业无线电广播电台,从此广播事业在世界各地蓬勃发展,收音机成为人们了解时事新闻的工具。1924年第一条短波通信线路在瑙恩和布宜诺斯艾利斯之间建立。1933年法国人克拉维尔建立了英法之间第一条商用微波无线电路,推动了无线电技术的进一步发展。

随着电子技术的高速发展,军事、科研领域中迫切需要升级的计算工具和技术也不断更新换代。1946年美国宾夕法尼亚大学的埃克特和莫希里研制出世界上第一台电子计算机。电子元器件材料的革新进一步促使电子计算机朝小型化、高精度、高可靠性方向发展。20世纪40年代,科学家们发现了半导体材料,用它制成晶体管,替代了电子管。1948年美国贝尔实验室的肖克莱、巴丁和布拉坦发明了晶体三极管,于是晶体管收音机、晶体管电视、晶体管计算机很快替代了各式各样的真空电子管产品。1959年美国的基尔比和诺伊斯发明了集成电路,微电子技术诞生。1967年大规模集成电路诞生,一块米粒般大小的硅晶片上可以集成1 000多个晶体管的线路。1977年美国、日本科学家制成超大规模集成电路,30平方毫米的硅晶片上集成了13万个晶体管。微电子技术极大地推动了电子计算机的更新换代,而电子计算机显示了前所未有的信息处理功能,成为现代高新科技的重要标志。20世纪80年代末多媒体技术的兴起,使计算机具备了综合处理文字、声音、图像、影视等各种形式信息的能力,计算机日益成为信息处理最重要和必不可少的工具。电子计算机和通信技术的紧密结合,标志着数字化信息时代的到来。

有线电话诞生于美国的贝尔实验室,第1代无线通信系统作为有线电话补充者的角色出现,也诞生于美国。这里有两个方面的原因:一方面,当时世界通信科技的中心在美国,其他国家根本就没有进入这个领域;另一方面,技术有着传承性,无线通信系统和有线通信系统在很多方面还是有着共同的或者类似的技术,除了在无线接入和有线接入的所谓“最后一公里”不同之外,其他方面都是非常接近的。当时,美国有朗讯和摩托罗拉,加拿大有北电网络,北美的这三家通信设备制造商,一起奠定了北美在世界通信领域的“统治”地位。

通信业在中国的发展有目共睹,其日新月异的变化也足以让世界震惊。从中华人民共和国成立到现在,中国通信业发展经历了两个阶段。第一个阶段是从1949年至1978年,属于通信业发展的探索阶段,实现了通信能力从无到有,保持着低水平的发展。这一阶段我国用于通信建设的投资仅有约60亿元人民币,通信状况很不乐观,市话为磁石电话(摇把子)、长途交换为人工转接,因为电话普及率很低,最普遍的通信方式是电报。到1978年,全国电话交换容量仅368万门,普及率仅为0.38%,也就是说,每百人拥有电话不到半门。第一阶段具有标志性的时间点可以归纳如下。

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,上海第一部纵横制自动电话交换机试制成功,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。

第二阶段是从1978年至今,属于通信业的高速发展阶段,通过通信人的努力,我国通信水平和通信规模都进入了世界前列。1978年至1988年,通信企业经历了转变观念、逐步对外开放和争取发展政策等重要发展过程。1988年至1998年为通信大发展期,主要表现为利用国家的初装费政策和外资加速折旧解决了资金问题,实现了通信建设的飞跃。1998年至2003年是发展与全面改革的五年,同时,也是拓宽服务、面向农村的五年。邮电分营、政企分开、移动独立、电信重组,改革力度之大,世界罕见。2003年至今是通信业继续发展的阶段,电信运营商纷纷转型,由通信转向信息应用,领域在拓宽,竞争日趋激烈。

信息公平社会的构建是第二阶段的主题之一，这期间具有标志性的时间点可以归纳如下。

1984年5月1日，广州用150 MHz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；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开通。

1994年7月19日，中国联合通信有限公司成立。

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。

1999年2月14日，国务院通过中国电信重组方案，中国移动集团、中国电信集团及中国卫通集团相继挂牌；同年4月，中国网络通信有限公司成立。

2008年5月23日，运营商重组方案正式公布。随着电信重组方案的确定，中国移动和中国铁通合并为中国移动，中国联通(CDMA网)和中国电信合并为中国电信，中国联通(GSM网)和中国网通合并为中国联通。至此，中国电信运营商形成了“三足鼎立”之势。

2009年1月7日，工业和信息化部(以下简称工信部)向中国移动、中国电信和中国联通发放3G牌照，此举标志着我国正式进入3G时代。三大运营商分别获得了相应的3G频段。其中，中国移动获得的频段是1880~1900 MHz和2010~2025 MHz，其3G标准基于TDD模式；中国电信获得的频段是1920~1935 MHz和2110~2125 MHz，其3G标准基于FDD模式；而中国联通获得的频段是1940~1955 MHz和2130~2145 MHz，3G标准也基于FDD模式。

2012年，我国主导的TD-LTE技术已成为第4代移动通信国际主流标准之一，并获得国际产业链的广泛支持。

2013年12月4日，工信部向中国移动、中国联通、中国电信下发了第一张4G牌照，我国正式迈入4G时代。

2014年，三大运营商资源重组，设立中国铁塔股份有限公司。

2015年2月27日，中国电信、中国联通获得第二张4G业务牌照(即FDD-LTE牌照)，我国全面进入4G规模商用时代。

2016年10月30日，物联网开始布局，固网宽带格局“变天”，中国移动宽带用户数超越中国联通。

2018年，工信部向三大运营商发放5G中低频实验许可证。

2019年6月6日，工信部向中国电信、中国移动、中国联通和中国广电正式颁发5G牌照，我国正式进入5G商用元年。

5G时代的新网络通信技术引发了一系列产业变革，其下载速率理论值可达10 Gb/s，是4G时代的100倍。在实际应用过程中，理想的情况下，用户可以在几秒内下载一部1 G左右的电影。5G高速率可以推动VR虚拟现实技术快速进步。

通信的目的是更多、更快、更好地传输信息，1G到5G的发展遵从通信的基本定律——香农定律。从香农定律来看，人类未来如果想做更好的通信，只能走更高的带宽、更高的频率。人们对于6G的想象也只是提出了THz通信理念，THz通信将会面临比毫米波GHz通信更高的技术挑战，也会对网络部署提出新的课题。在香农定律所指明的路径之外，另一个方式就是设法提高单位信息量的密度。量子计算和量子通信技术正朝着这一方向发展。

趣味小课堂：组成课堂小组，讨论当下通信技术发展现状，以及中国在通信领域的崛起历程和所拥有的越来越多的话语权。

1.3 通信系统的分类及通信方式

1.3.1 通信系统的分类

根据分类方法的不同,可以将通信系统分成很多种类。下面介绍几种较常用的分类方法。

1. 按消息的物理特征分类

按消息的物理特征分类,通信系统可分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统和图像通信系统等。由于电话通信网最为发达普及,其他消息常通过公共的电话通信网传送。在综合业务通信网中,各种类型的消息都在统一的通信网中传送。

2. 按传输介质分类

按传输介质分类,通信系统可分为有线通信系统(包括光纤)和无线通信系统两种。有线通信是传输介质为导线、电缆、光缆、波导等形式的通信,其特点是介质能看得见、摸得着。无线通信是以看不见、摸不着的介质(如电磁波)来传输消息的通信。

3. 按信道中所传信号的特征分类

按信道中所传信号的特征分类,通信系统可分为模拟通信系统与数字通信系统。凡信号的某一参量可以取无限多个数值且直接与消息相对应的,称为模拟信号。模拟信号有时也称连续信号,这个“连续”指信号的某一参量可以连续变化(即可以取无限多个值),而不一定在时间上也连续。凡信号的某一参量只能取有限个数值,并且常常不直接与消息相对应的,称为数字信号。数字信号有时也称离散信号,指信号的某一参量是离散变化的,而不一定在时间上也离散。

4. 按工作频段分类

按工作频段分类,通信系统可分为长波通信系统、中波通信系统、短波通信系统、微波通信系统。通信使用的频段如表 1.1 所示。

表 1.1 通信使用的频段

频率范围(f)	符号	通信方式
3 Hz~30 kHz	甚低频(VLF)	长波通信
30 kHz~300 kHz	低频(LF)	
300 kHz~3 MHz	中频(MF)	中波通信
3 MHz~30 MHz	高频(HF)	短波通信
30 MHz~300 MHz	甚高频(VHF)	
300 MHz~3 GHz	特高频(UHF)	微波通信
3 GHz~30 GHz	超高频(SHF)	
30 GHz~300 GHz	极高频(EHF)	
10^5 GHz~ 10^7 GHz	紫外、可见光红外线	

5. 按调制方式分类

对于模拟信号来说,根据调制方式的不同可以将通信系统分为线性调制通信系统与非线性调制通信系统两种。其中,线性调制有常规幅度调制、单边带幅度调制、双边带幅度调制与残留边带幅度调制,非线性调制包括频率调制与相位调制。对于数字信号,调制可以分为幅度键控调制、频率键控调制、相位键控调制与其他高效数字调制。调制又可以根据脉冲调制方式的不同分为脉冲模拟调制与脉冲数字调

制两种。脉冲模拟调制可以分为脉冲幅度调制、脉冲宽度调制和脉冲相位调制，脉冲数字调制可以分为脉冲编码调制、增量调制和差分脉码调制。

另外，通信还有一些其他的分类方法，这里就不再一一举例。

1.3.2 通信方式

通信过程可以分为点对点通信、点对面通信、网络通信。点对点通信是一对一通信，如常用的电话、对讲机等；点对面通信是一对多通信，如广播、电视等；网络通信是指网络中用户间的通信，如计算机网络通信、电话交换网络通信等。这里只讨论点对点通信，这也是其他通信方式的基础。

1. 按消息传送的方向与时间划分

按消息传送的方向与时间划分，通信方式可分为单工通信、半双工通信及全双工通信三种，具体如图 1.6 所示。

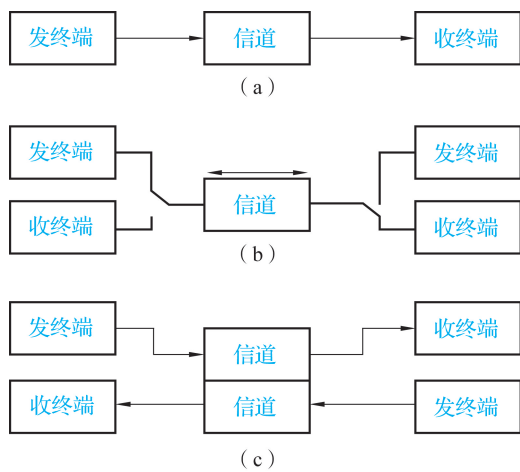


图 1.6 按消息传送的方向与时间划分的通信方式
(a)单工通信；(b)半双工通信；(c)全双工通信

单工通信方式是消息只能单方向进行传输的一种通信方式，如图 1.6(a)所示。单工通信的例子有很多，如广播、遥控、无线寻呼等，这里信号(消息)只从广播发射台、遥控器和无线寻呼中心分别传到收音机、遥控对象和 BB 机上。

半双工通信方式是通信双方都能收发消息，但不能同时进行收和发的通信方式，如图 1.6(b)所示。例如，对讲机、收发报机等都是这种通信方式。

全双工通信方式是通信双方可同时进行双向传输消息的通信方式，如图 1.6(c)所示。采用这种方式，双方都可同时进行收发消息。很明显，全双工通信的信道必须是双向信道。生活中全双工通信的例子非常多，如普通电话、各种手机等。

2. 按信号传输的次序划分

在数字通信中，按照数字信号传输的次序，可将通信方式分为串行传输和并行传输，具体如图 1.7 所示。

所谓串行传输，是指将代表信息的数字信号序列按时间顺序一个接一个地在信道中传输的方式。如果将代表信息的数字信号序列分割成两路或两路以上的数字信号序列同时在信道上传输，则称为并序传输通信方式。

串行传输方式只需占用一条通路，但传输占用时间相对较长；并行传输方式占用多条通路同时传输信息，传输时间短。两种方式各有利弊。

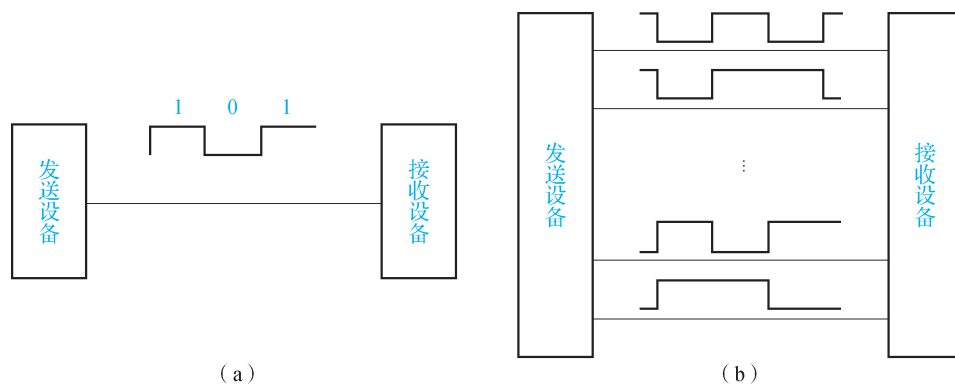


图 1.7 按信号传输的次序划分的通信方式

(a) 串行传输; (b) 并行传输

1.4 通信系统的主要性能指标

1.4.1 衡量通信系统好坏的两个标准

人们对于通信系统的要求是多方面的,评价通信系统的优劣包括信息传输的有效性、可靠性、适应性、标准性、经济性,甚至还包括设备造型的优美性等。对一个通信系统起主导和决定作用的是有效性和可靠性这两个指标,这也是人们衡量通信系统好坏的两个标准。那么何为有效性和可靠性呢?有效性是通信系统传输信息的速率表征,而可靠性是通信系统传输信息的质量表征。传输速度越快,有效性越高;传输信号越准确,可靠性越高。在通信系统中,人们总是希望传输信息既快又准,即既有效又可靠。然而,有效性和可靠性两者之间却是矛盾的,这一点,通过以后的进一步学习将会有更深的体会。一般情况下,要增加系统的有效性,就得降低可靠性,反之亦然。在实际中,常常依据系统要求采取相对统一的办法,即在满足一定可靠性指标下,尽量提高消息的传输速率,即尽量提高有效性;或者,在维持一定有效性条件下,尽可能提高系统的可靠性。两者如何进行选择,可以根据通信系统的具体要求来进行。

1.4.2 评价两个指标的重要参量

1. 有效性

数字通信系统的有效性可用信息传输速率来衡量,传输速率越高,系统的有效性就越好。对于数字信号,传输速率快慢通常用以下参量来衡量。

1) 码元传输速率 R_B

数字通信是用有限个数字波形来代表信息的,那么每秒钟所传输的数字波形的数目就是传输速率,即码元传输速率,通常又可称为码元速率或波形速率,用符号 R_B 来表示,单位为波特(Baud,常用符号“B”表示)。例如,某系统在2秒内共传送4 800个码元,则该系统的码元速率为2 400 B。码元速率与码元宽度 T_b 有关,其计算公式为

$$R_B = \frac{1}{T_b} \quad (1.1)$$

然而,仅用传输速率来表征有效性是不够的,因为传输速率仅仅表征的是单位时间内传送数字波形的数目,而没有限定这种波形采用的是多少进制。在实际通信中,由于传输的信息量通常比较大,一般

采用多进制来进行信息的传输。码元速率 R_B 表征的是单位时间内传送的码元数, 若通信系统能够不变, 码元速率应该只与码元宽度 T_b 有关, 而与信息的进制数无关。根据这点可以知道多进制码元速率 R_{BN} 与二进制码元速率 R_{B2} 之间, 在保证系统信息速率不变的情况下, 可以相互转换, 其转换关系式为

$$R_{B2} = R_{BN} \cdot \log_2 N(B) \quad (1.2)$$

式中, N 应为 2^k , 其中 k 为不小于 2 的整数。

2) 信息传输速率 R_b

信息传输速率简称信息速率, 又可称为传信率、比特率等。信息传输速率用符号 R_b 表示。 R_b 是单位时间(每秒钟)内传送的信息量, 单位为比特每秒(bit/s), 简记为 b/s 或 bps。例如, 若某信源在 1 秒钟内可传送 1 200 个符号, 且每一个符号的平均信息量为 1 bit, 则该信源的 $R_b = 1\,200$ b/s 或 1 200 bps, R_b 也与 N 有关。

3) 消息传输速率 R_m

消息传输速率亦称消息速率, 它是单位时间(每秒钟)内传输的消息数, 用 R_m 表示。因消息的衡量单位不同, 有各种不同的含义。例如, 当消息的单位是汉字时, R_m 的单位为字每秒。消息速率在实际中应用不多。

4) R_b 与 R_B 之间的互换

在二进制中, 码元速率 R_{B2} 同信息速率 R_{b2} 的关系在数值上相等, 但单位不同。在多进制中, R_{BN} 与 R_{bN} 之间数值不同, 单位亦不同。它们之间在数值上的关系为

$$R_{bN} = R_{BN} \cdot \log_2 N \quad (1.3)$$

在码元速率保持不变的条件下, 二进制信息速率 R_{b2} 与多进制信息速率 R_{bN} 之间的关系为

$$R_{b2} = \frac{R_{bN}}{\log_2 N} \quad (1.4)$$

5) 频带利用率

频带利用率指的是传输效率, 也就是说, 人们不仅关心通信系统的传输速率, 还要看在这样的传输速率下所占用的信道频带宽度是多少。如果频带利用率高, 说明通信系统的传输效率高, 否则相反。

频带利用率的定义是单位频带内码元传输速率的大小, 即

$$\eta = \frac{R_B}{B} \text{ (B/Hz)} \quad (1.5)$$

频带宽度 B 的大小取决于码元速率 R_B , 而码元速率 R_B 与信息速率有确定的关系。因此, 频带利用率还可利用信息速率 R_b 的形式来定义, 以便比较不同系统的传输效率, 即

$$\eta = \frac{R_b}{B} \text{ [b/(s} \cdot \text{Hz)]} \quad (1.6)$$

2. 可靠性

数字通信系统的可靠性指标可用信息在传输过程中出错的概率来衡量, 即用差错率来衡量。差错率越大, 表明系统的可靠性越差。差错率通常有两种表示方法。

1) 码元差错率 P_e

码元差错率 P_e 简称误码率, 它是单位时间内, 接收的错误码元数在系统传输的总码元数(正确码元数+错误码元数)中所占的比例。更确切地说, 误码率就是码元在系统传输过程中被传错的概率, 其表达式为

$$P_e = \frac{\text{单位时间内接收的错误码元数}}{\text{单位时间内系统传输的总码元数}} \quad (1.7)$$

2) 信息差错率 P_{eb}

信息差错率 P_{eb} 简称误信率, 或误比特率, 它是单位时间内, 接收的错误信息量在系统传输的信息总

量中所占的比例。或者说,误信率是码元的信息量在系统传输过程中丢失的概率,其表达式为

$$P_{\text{eb}} = \frac{\text{单位时间内系统传输中出错(丢失)的比特数(信息量)}}{\text{单位时间内系统传输的总比特数(总信息量)}} \quad (1.8)$$

误码率表达式(1.7)和误信率表达式(1.8)常用来计算系统的误码率和误信率。

【例 1.1】已知某八进制数字通信系统的信息速率为 12 000 b/s,在接收端半小时内共测得错误码元 216 个,试求该系统的误码率。

解:

$$R_{\text{b8}} = 12\,000 \text{ b/s}$$

$$R_{\text{B8}} = \frac{R_{\text{b8}}}{\log_2 8} = 4\,000 \text{ B}$$

则系统误码率为

$$P_e = \frac{216}{4\,000 \times 30 \times 60} = 3 \times 10^{-5}$$

这里需要注意的问题是,一定要把码元速率 R_{B} 和信息速率 R_{b} 的条件搞清楚,如果不细心,此题容易误算出 $P_e = 10^{-5}$ 的结果。另外还需强调的是,如果已知条件给出了码元速率和接收端出现错误的信息量,也同样需要注意速率转换问题。

1.5 信息量度量

消息是对人或事物情况的报道。信号是消息的载体,也就是消息的携带者。通信过程中,系统将消息变成电信号、光信号等信号形式,完成消息的传送。信息是对于接收者来说事先不知道的消息。因此消息和信息是不同的。信息的含义更具普遍性、抽象性。信息可被理解为消息中包含的有意义的内容;消息可以有各种各样的形式,但消息的内容可统一用信息来表述。传输信息的多少可直观地使用“信息量”进行衡量。那么如何来衡量传递的消息中信息量的值呢?

对接收者来说,事件愈不可能发生,愈会使人感到意外和惊奇,信息量就愈大。而事件出现的概率可以用事件的不确定程度来描述,事件出现(发生)的可能性愈小,概率就愈小;反之,概率就愈大。基于这种认识可以得到:消息中的信息量与消息发生的概率紧密相关。消息出现的概率愈小,消息中包含的信息量就愈大。概率为零时(不可能发生事件),信息量为无穷大;概率为 1 时(必然事件),信息量为 0。

综上所述,可以得出消息中所含信息量与消息出现的概率之间的关系应有如下规律。

(1) 消息中所含信息量 I 是消息出现概率 $P(x)$ 的函数,即

$$I = I[P(x)] \quad (1.9)$$

(2) 消息出现的概率愈小,它所含信息量就愈大;反之,信息量就愈小。且 $P=1$ 时, $I=0$; $P=0$ 时, $I=\infty$ 。

(3) 若干个互相独立事件构成的消息,所含信息量等于各独立事件信息量的和,即

$$I[P(x_1), P(x_2), \dots] = I[P(x_1)] + I[P(x_2)] + \dots \quad (1.10)$$

若事件发生的概率为 $P(x)$, 消息的信息量用 I 来表示,则它们之间的关系为

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.11)$$

信息量 I 的单位与对数的底数 a 有关:当 $a=2$ 时,单位为比特(bit,简写为 b);当 $a=e$ 时,单位为奈特(nat,简写为 n);当 $a=10$ 时,单位为笛特(Det)或称为十进制单位。

在数字通信系统中,通常采用以 2 为底的对数形式来计算信息量。

下面讨论等概率出现的离散信息的度量，假设信源传送的是“晴”“雨”两个气象消息：

“晴”—— a

“雨”—— b

字母 a 、 b 可看作是一个消息(离散消息)，可用适当的波形来传送每一个消息，假设用二进制脉冲传送这两个消息。

消息信号：电压 0 V 脉冲代表消息 a (晴)；电压 1 V 脉冲代表消息 b (雨)。

如果每一消息信号是等概率出现的，则有

$$P(a)=P(b), \text{ 即 } P(1)=P(0)=\frac{1}{2}$$

每一消息信号传输(传送)载荷的信息量为

$$I(0)=I(1)=-\log_2 \frac{1}{2}=1 \text{ bit}$$

在表 1.2 中，考虑 4 条消息等概率出现的情况，用四进制脉冲也能传送 a 、 b 、 c 、 d 这 4 条消息。

表 1.2 四进制脉冲情况

4 进制 脉冲波形	消息	消息信号 的脉冲波形	消息出现的概率	每一消息信号 携带的信息量
	a (晴)		$P(a)=P(0, 0)=\frac{1}{4}$	$I(a)=2 \text{ bit}$
	b (雨)		$P(b)=P(0, 1)=\frac{1}{4}$	$I(b)=2 \text{ bit}$
	c (多云)		$P(c)=P(1, 0)=\frac{1}{4}$	$I(c)=2 \text{ bit}$
	d (大风)		$P(d)=P(1, 1)=\frac{1}{4}$	$I(d)=2 \text{ bit}$

四进制脉冲情况：用四进制脉冲也能传送 4 条消息，或者说用单个四进制脉冲也能传送两个二进制脉冲所传送的信息。因此单个四进制脉冲能传送 2 bit 信息。

1 个二进制脉冲能传送 1 bit 信息，可表示 2 个消息；

2 个二进制脉冲能传送 2 bit 信息，可表示 4 个消息；

3 个二进制脉冲能传送 3 bit 信息，可表示 8 个消息；

.....

k 个二进制脉冲能传送 k bit 信息，可表示 2^k 个消息。

若 2^k 个消息等概率出现，且各消息之间相互独立，则信息量为

$$I=\log_2 \frac{1}{\frac{1}{2^k}}=\log_2 2^k=k(\text{bit}) \tag{1.12}$$

下面考虑非等概率出现的情况。

设离散信源是一个由 n 个符号组成的集合 $(x_1, x_2, \cdots, x_n)$ ，按 $p(x_i)$ 独立出现。记为

$$\begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_i & \cdots & x_n \\ p(x_1) & p(x_2) & \cdots & p(x_i) & \cdots & p(x_n) \end{bmatrix} \tag{1.13}$$

且有

$$\sum_{i=1}^n p(x_i)=1 \tag{1.14}$$

则 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 各符号的信息量分别为 $[-\log_2 p(x_1), -\log_2 p(x_2), \dots, -\log_2 p(x_n)]$ 。这里每个符号(消息)的信息量不同。下面引入平均信息量 $H(x)$, 它等于各个符号的信息量乘各自出现的概率再相加, 其单位为比特/符号。 $H(x)$ 的表达式为

$$H(x) = p(x_1)[-\log_2 p(x_1)] + \dots + p(x_n)[-\log_2 p(x_n)] = \sum_{i=1}^n p(x_i)[-\log_2 p(x_i)] \quad (1.15)$$

由于 H 同热力学中熵的形式相似, 通常又称为信源的熵。显然, 当 $p(x_i) = \frac{1}{M}$ (每个符号等概率独立出现)时, 式(1.15)取得最大值。

【例 1.2】设由 5 个符号组成的信源(每条消息分别用字母 A、B、C、D、E 表示), 相应概率为

$$\begin{bmatrix} A & B & C & D & E \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & \frac{1}{16} & \frac{1}{16} \end{bmatrix}$$

求这 5 条消息的平均信息量 $H(x)$ 。

解: 根据题意和式(1.15), 可得

$$H(x) = \frac{1}{2} \log_2 2 + \frac{1}{4} \log_2 4 + \frac{1}{8} \log_2 8 + \frac{1}{16} \log_2 16 + \frac{1}{16} \log_2 16 = 1.875 \text{ 比特/符号}$$

【例 1.3】一离散信源由 1、2、3、4 共 4 个符号组成, 它们出现的概率分别是 $\frac{3}{8}$ 、 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{8}$, 且每个符号独立出现, 试求消息 201020130213001203210100321010023102002010312032100120210 的信息量。

解: 根据题意, 先对消息中每个符号出现的个数进行统计(“~”前的数表示符号, “~”后的数表示出现的个数)。

$$\left. \begin{array}{l} 0 \sim 23 \\ 1 \sim 14 \\ 2 \sim 13 \\ 3 \sim 7 \end{array} \right\} \text{共 57 个符号}$$

这 57 个符号代表的消息中, 出现 0 的信息量为 $23 \cdot \log_2 \frac{8}{3} \approx 33 \text{ bit}$, 出现 1 的信息量为 $14 \cdot \log_2 4 = 28 \text{ bit}$, 出现 2 的信息量为 $13 \cdot \log_2 4 = 26 \text{ bit}$, 出现 3 的信息量为 $7 \cdot \log_2 8 = 21 \text{ bit}$ 。故发送消息的总信息量为 $I = 33 + 28 + 26 + 21 = 108 \text{ bit}$, 平均信息量为

$$\bar{I} = \frac{I}{\text{符号总数}} = \frac{108}{57} \approx 1.89 \text{ 比特/符号} \quad (1.16)$$

求平均信息量也可以用式(1.15), 即

$$\bar{I} = -\frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} \approx 1.906 \text{ 比特/符号} \quad (1.17)$$

比较式(1.16)和式(1.17), 两种方法的计算结果有一定的差异。若消息中符号数目为无穷大, 则这两种方法的计算结果相等。

思考与练习

1. 数字通信系统的有效性和可靠性是一对矛盾, 为什么?
2. 什么是码元速率? 什么是信息速率? 在二进制和多进制情况下, 码元速率和信息速率之间的关系如何?

3. 某信源的符号集由 A、B、C、D 和 E 组成, 设每一符号独立出现, 其出现概率分别为 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{8}$ 、 $\frac{1}{8}$ 、

$\frac{3}{16}$ 、 $\frac{5}{16}$ 。信源以 1 000 B 的速率传送信息，则传送 1 h 的信息量为多少？传送 1 h 可能达到的最大信息量为多少？

4. 设英文字母 E 出现的概率为 0.105， x 出现的概率为 0.002。试求 E 及 x 的信息量。

5. 一个由 A 、 B 、 C 、 D 组成的消息，对其传输的每一个字母用二进制脉冲编码，“00”代表 A ，“01”代表 B ，“10”代表 C ，“11”代表 D ，每个脉冲宽度为 5 ms。

(1) 不同的字母是等可能出现时，试计算传输的平均信息速率。

(2) 若每个字母出现的可能性分别为 $P_A = \frac{1}{5}$ 、 $P_B = \frac{1}{4}$ 、 $P_C = \frac{1}{4}$ 、 $P_D = \frac{3}{10}$ ，试计算传输的平均信息速率。

6. 设某信源由 128 个不同符号组成，其中 16 个符号出现的概率为 $\frac{1}{32}$ ，其余 112 个符号等概率出现。

该信源每秒发出 1 000 个符号，且每个符号彼此独立，试计算该信源的平均信息速率。

第 2 章

确定信号分析

本章导读

按时间函数的确定性划分,可将信号分为确定信号和随机信号两大类。可以用明确的数学表达式表示的信号称为确定信号。对于指定的某一时刻来说,该信号的取值总是唯一确定的,如正弦信号、指数信号、矩形信号等。随机信号与之不同,通常总带有某种不确定性,如语音信号、电视信号、噪音信号等。实际工程中,传输的信号几乎都具有不确定性,因而几乎都是随机信号。但随机信号有时也要借助确定信号加以分析,例如数字信号中常用的二进制代码。二进制代码自身虽然是随机的,但单独出现的“1”码或“0”码的波形,可以看成确定信号。另外,随机信号与确定信号的分析方法有许多共同之处,这些性质都说明了确定信号分析的重要性。本章将介绍确定信号的分析方法。

学习目标

知识与技能目标

- ① 了解信号的分类及其特征。
- ② 掌握确定信号的频域分析方法和频谱的概念。
- ③ 学会傅里叶变换及其基本性质。
- ④ 学会利用 MATLAB 绘制各类确定信号的波形。
- ⑤ 学会利用 MATLAB 计算确定信号的频谱。
- ⑥ 学会利用 MATLAB 计算确定信号的功率或能量。

素质目标

- ① 培养职业精神。
- ② 具有勇攀科学高峰的精神。
- ③ 激发民族自豪感。

2.1 重要确定信号简介

有一类确定信号，它由很简单的数学形式组成，但是函数本身有不连续点或其导数、积分有不连续点，数学上通常把这类函数叫作奇异函数。下面介绍几种重要的奇异函数。

2.1.1 单位斜坡信号

单位斜坡信号以符号 $r(t)$ 表示，其定义为

$$r(t) = \begin{cases} t, & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

它表示从 $t=0$ 开始且随后具有单位斜率的时间函数，其波形如图 2.1(a) 所示。如果要求斜率不为 1，那么只需要用一个常数去乘 $r(t)$ 即可。对于 $b>0$ ，函数 $b \cdot r(t)$ 就是斜率为 b 的斜坡信号，其波形如图 2.1(b) 所示。

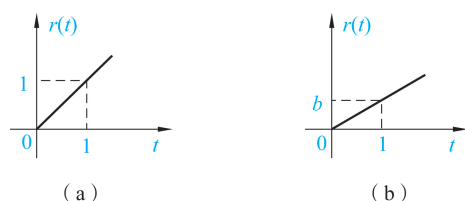


图 2.1 单位斜坡信号及斜率为 b 的斜坡信号波形图
(a) 单位斜坡信号波形图；(b) 斜率为 b 的斜坡信号波形图

2.1.2 单位阶跃信号

单位阶跃信号用符号 $u(t)$ 或 $\varepsilon(t)$ 表示，其跃变点 $t=0$ 处的函数值未知。单位阶跃信号的波形如图 2.2(a) 所示，对应的表达式为

$$u(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

若单位阶跃信号跃变点在 $t=t_0$ 处，则称其为延迟单位阶跃信号，其波形如图 2.2(b) 所示，对应的表达式为

$$u(t-t_0) = \begin{cases} 0, & t < t_0 \\ 1, & t > t_0 \end{cases} \quad (2.3)$$

单位阶跃信号是信号分析中的基本信号之一，在信号与系统分析中有着非常重要的作用，通常用它来表示信号的定义域，简化信号的时域表示形式。

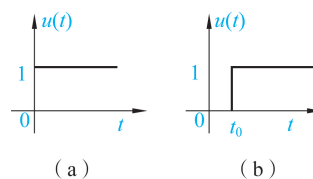


图 2.2 单位阶跃信号及延迟单位阶跃信号波形图

(a) 单位阶跃信号；(b) 延迟单位阶跃信号

2.1.3 单位冲激信号

当采用狄拉克函数表示时，单位冲激信号称为狄拉克函数，此时有

$$\begin{cases} \delta(t) = 0, & t \neq 0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1, & t = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$