



普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

communication
theory

通信原理 简明教程

© 邬正义 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书以现代通信系统为背景,以点对点的电信号通信为主线,全面介绍通信的基本工作原理和分析方法。内容包括通信的基本概念、模拟调制系统、信源编码、数字信号的基带传输系统、数字信号的调制传输系统、差错控制与信道编码和同步原理。本书涵盖了工科电类非通信专业对通信原理教学的基本需要,可作为自动化、电气工程与自动化、电子信息工程、光电信息工程、检测技术与仪表和计算机应用技术等专业的本科生和专科生教材。

本书内容简洁,语言流畅,各章配有丰富的例题和习题,紧密联系工程实际,基本物理概念叙述清楚,理论分析脉络清晰,没有冗长繁琐的数学推导,读者只要先修过微积分、电路和电子技术、信号与系统等课程,就能顺利地阅读和自学。因此,本书也可作为相关工程技术人员的专业培训教材或参考用书。

本书配有免费电子课件,欢迎使用本书作教材的老师发邮件到 Jinacmp@163.com索取,或登录 www.cmpedu.com 注册下载。

图书在版编目 (CIP) 数据

通信原理简明教程/邬正义主编. —北京:机械工业出版社,2012.2
普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材
ISBN 978-7-111-36604-1

I. ①通… II. ①邬… III. ①通信原理 - 高等学校 - 教材 IV.
①TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 268373 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
策划编辑:吉玲 责任编辑:吉玲 常建丽 刘丽敏
版式设计:霍永明 责任校对:王欣
封面设计:张静 责任印制:杨曦
保定市中国画美凯印刷有限公司印刷
2012 年 2 月第 1 版第 1 次印刷
184mm × 260mm · 10.5 印张 · 253 千字
标准书号:ISBN 978-7-111-36604-1
定价:23.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

普通高等教育电气工程与自动化(应用型)“十二五”规划教材

编审委员会委员名单

主任委员:刘国荣

副主任委员:

张德江 梁景凯 张元 袁德成 焦斌

吕进 胡国文 刘启中 汤天浩 黄家善

钱平 王保家

委员(按姓氏笔画排序):

丁元明 马修水 王再英 王军 叶树江

孙晓云 朱一纶 张立臣 李先允 李秀娟

李海富 杨宁 陈志新 周渊深 尚丽萍

罗文广 罗印升 罗兵 范立南 娄国焕

赵巧娥 项新建 徐建英 郭伟 高亮

韩成浩 蔡子亮 樊立萍 穆向阳

前 言

21 世纪, 人类进入了信息时代。信息成为人类社会继物质、能源以后第三大重要的生活和生产要素。信息和物质不同, 信息是无形的, 又是不可或缺的。信息必须流动才有活力, 因此, 信息的传递成为人们关心的大事。通信的本质就是让信息按照人们的意愿又快又好地流动。人类早在几千年前就已经开始研究信息传递的方法, 一部人类文明进化史很大一部分内容就是人类传递信息、交流信息的故事。在电磁波的存在被人们逐渐认识到后, 通信的基本手段一直围绕着电波传递而展开, 因此现代通信的基本原理就是电信号通信原理。随着科技的发展和工业化进程的推进, 各个行业都与电信号的控制和传递挂上了钩, 因此, 不但通信专业的学生必须学习“通信原理”, 凡是今后希望从事电子信息工程、自动化、电气工程、计算机应用等工作的学生, 了解和掌握现代通信原理的基本理论都变得越来越迫切和重要。为这些非通信专业的电类本科学生提供一本适合他们学习的通信原理教程, 是作者编写本书的初衷。

我们希望本书能涵盖目前各校电类非通信专业“通信原理”的基本教学内容, 经反复研究和讨论, 将全书分为 7 章。第 1 章是全书的基础和铺垫, 主要介绍通信的基本概念, 为信息传输的定量分析和计算做准备。在这一章里, 还复习了先修课程的内容, 如“信号与系统”的一些重要概念, 使读者在知识的衔接上更顺畅和自然。对于“随机信号和随机过程”等知识, 也做了简要介绍, 以便没学过这方面课程的读者参考, 用 * 号标出, 可作为选读内容。第 2 章介绍模拟调制系统, 这部分内容可能会与其他课程, 如“高频电子电路”有某些重复, 但我们觉得还是要放进去。因为内容虽然相似, 但教学的出发点是不同的, “通信原理”中的模拟调制系统侧重于原理的分析与计算, 而“高频电子电路”中的模拟调制系统则侧重于电路的实现和构成。况且各学校在安排这两门课程时会有先后次序的不同, 为了保证体系的完整, 也为了后面学习数字通信原理奠定坚实的基础, 这一章的内容是不可缺少的。第 3 章介绍信源编码, 这一章是模拟信号向数字信号的自然过渡, 安排在这里可以起承上启下的作用, 符合读者的思维习惯, 主要介绍波形编码的两个重要的抽样定理, 并对 PCM 编码和非均匀编码方法做了详细分析。第 4 章介绍数字信号的基带传输, 从讨论基带波形入手, 分析计算各种基带信号的功率谱, 并对基带传输中影响传输效果的两个因素: 码间干扰和噪声的影响分别做了较详细的讨论。为了减轻读者的学习负担, 未加入理论色彩较浓的最佳接收机的内容, 第 4 章最后还简单介绍了眼图和时域均衡方法。第 5 章介绍数字信号的调制传输, 详细分析了 3 种最基本的数字调制和多进制调制波形, 分析了二进制调制的抗噪声性能, 并通过正交幅度调制 (QAM) 和最小频移键控 (MSK) 调制两种目前比较成熟的高性能数字调制方法的介绍, 使读者对现在各种新型先进调制方法的基本思想有所了解, 为今后实际应用打下基础。第 6 章介绍差错控制与信道编码。编码理论已经成为一门独立的学科, 在通信原理的入门课程里先对信道编码的基本方法有所了解, 可以使学生打下这方面学

习的基础，为今后从事通信电路研制和软件开发，以及进一步深造学习做好准备。第7章比较简洁地介绍了通信中的3类同步问题。

我们一贯认为，一本好的专业教科书首先是为读者自学和阅读服务的，因此让读者读得懂是对读者的尊重和负责。言简意赅、脉络清晰是我们编写本书时遵循的基本原则。已经出版的通信原理的专著和教材很多，其中不乏经典巨著，但我们在教学过程中发现，如果过于强调理论的严密，会使阅读难度增加，使初学者望而生畏，冗长的数学推导有时会使学生忽略许多物理本质而迷失方向，内容过于强调完整、全面，篇幅过大也会使读者负担过重。学习是一种螺旋形上升的过程，很多思维方法的形成需要循序渐进，不能一蹴而就。本书也是直接为教师参考和服务的，我们在编写的同时制作了配套的课堂用教学PPT，可以提供给需要的教师参考使用。现在，一般本科院校非通信专业的“通信原理”课程往往只有48学时，要在有限的学时内使学生掌握通信的基本原理，因此非常需要一本内容相对简明，能够帮助读者在较短时间里理清思路，理解概念，进入通信殿堂的引导性教材，所以本书定名为《通信原理简明教程》。

近年来，我们一直致力于专业课程教学的改革和研究，如何使缺乏实践经验的大学生在已有知识的基础上顺利进入专业课程的学习，适应日新月异的新旧知识的快速更替，尽量缩小在概念理解上的跨度，提高自主学习的能力，始终是我们在教学实践中关注的重点。本书就是我们在这方面努力探索的结晶。本书编写具体分工如下：张莉编写第1、2章，汤晓燕编写第3章，陈琦玮编写第4章，邬正义编写第5~7章并对全书统编定稿。

由于编者水平有限，书中难免会有叙述不清甚至错误的地方，欢迎各高校同行和专家学者批评指正。本书在编写过程中参考或引用了已经出版的各方面专业书籍的一些内容或研究成果，已在书后的参考文献中一一列出，对于这些文献的作者，我们表示衷心的感谢。最后，我们对机械工业出版社责任编辑在本书出版中的关心和支持表示谢意。

编 者

目 录

前言

第 1 章 通信的基本概念	1
1.1 通信与通信系统	1
1.1.1 通信	1
1.1.2 通信系统	3
1.2 信息与信息的量度	6
1.2.1 信息、信号与消息	6
1.2.2 信息的量度	7
1.3 信道及信道容量	10
1.3.1 信道的数学模型	10
1.3.2 信道容量	12
1.4 通信系统的主要性能指标	14
1.4.1 通信系统的有效性	14
1.4.2 通信系统的可靠性	15
* 1.5 随机信号分析基础	15
1.5.1 随机变量与平稳随机过程	16
1.5.2 信号的能量谱与功率谱	22
1.5.3 高斯白噪声	23
习题	25
第 2 章 模拟调制系统	27
2.1 调制原理	27
2.1.1 调制的作用	27
2.1.2 调制方法的分类	28
2.2 幅度调制	28
2.2.1 标准调幅	29
2.2.2 抑制载波的双边带调幅	31
2.2.3 单边带调幅	33
* 2.2.4 残留边带调幅	35
2.2.5 相干解调与包络检波	36
2.3 幅度调制系统的抗噪声性能分析	37
2.3.1 线性调制相干解调的抗噪声性能	38
2.3.2 常规调幅包络检波的抗噪声性能	42
2.4 角度调制	45
2.4.1 相位调制与频率调制	45
2.4.2 调频信号的频谱和带宽	46

* 2.4.3 调频信号的产生和解调	49
2.4.4 各种模拟调制系统的性能比较	53
习题	54
第 3 章 信源编码	56
3.1 信源编码的基本概念	56
3.2 脉冲编码调制	57
3.2.1 抽样与抽样定理	57
3.2.2 量化	60
3.2.3 编码与解码	64
3.3 差分脉冲编码调制	68
3.3.1 差分脉冲编码调制原理	68
3.3.2 差分脉冲编码调制系统的抗噪声性能	69
3.4 增量调制	70
3.4.1 增量调制原理	70
3.4.2 增量调制系统的抗噪声性能	72
习题	73
第 4 章 数字信号的基带传输	76
4.1 数字基带信号	76
4.1.1 数字基带传输的码型选择	78
4.1.2 数字基带信号的频谱	81
4.2 数字基带传输系统	83
4.2.1 数字基带传输系统的构成	83
4.2.2 无码间串扰的基带传输系统特性	84
4.2.3 数字基带传输系统的抗噪声性能	93
4.3 数字基带传输系统的测量与调整	94
4.3.1 眼图	94
4.3.2 均衡器	95
习题	96
第 5 章 数字信号的调制传输	99
5.1 二进制数字调制	99
5.1.1 二进制幅移键控	99
5.1.2 二进制频移键控	101
5.1.3 二进制相移键控	102
5.1.4 二进制差分相移键控	104

5.2 二进制数字调制的抗噪声性能	106	6.3 卷积码	136
5.2.1 2ASK 信号的抗噪声性能	106	6.3.1 卷积码的编码	136
5.2.2 2FSK 信号的抗噪声性能	109	6.3.2 卷积码的译码	138
5.2.3 2PSK 和 2DPSK 信号的抗 噪声性能	112	6.4 先进信道编码技术	139
5.2.4 二进制数字调制系统的性能 比较	113	习题	140
5.3 多进制数字调制	113	第 7 章 同步原理	142
5.3.1 多进制幅度键控	113	7.1 概述	142
5.3.2 多进制频移键控	115	7.2 载波同步	142
5.3.3 多进制相移键控	116	7.2.1 直接产生法	142
5.4 新型数字调制技术	118	7.2.2 插入导频法	144
5.4.1 正交幅度调制	118	7.3 位同步	146
5.4.2 最小频移键控	120	7.3.1 外同步法	146
习题	122	7.3.2 自同步法	146
第 6 章 差错控制与信道编码	124	7.4 群同步	148
6.1 数字通信系统的差错控制	124	7.4.1 起止式同步法	148
6.1.1 差错控制的手段与方式	124	7.4.2 集中插入法	149
6.1.2 几种常用的检错编码	125	7.4.3 分散插入法	151
6.1.3 差错控制编码原理	127	习题	152
6.2 线性分组码	128	附录	153
6.2.1 汉明码	128	附录 A 误差函数值表	153
6.2.2 循环码	133	附录 B 贝塞尔函数值表	156
		参考文献	157

第1章 通信的基本概念

人类社会的发展和进步离不开信息的交互，社会越进步，信息交互就越频繁。进入21世纪以来，通信与网络就像决堤的洪水一般迅速渗透到人们生存环境的每一个角落，使人们无时无刻不感受到信息时代给生活带来的巨大变革。通信与传感器技术、计算机技术紧密结合，相互融合，已经成为推动人类社会文明、进步与发展的巨大动力。

通信，顾名思义就是信息的传输与交换。本书的主要内容就是阐述信息传输与交换的基本原理。现代通信原理建立在信息论、调制与编码、信号与系统等理论的基础上，为了使读者能更好地理解这些基本原理，本章作为后续各个章节的铺垫，主要介绍通信的基本概念、通信系统的组成及其分类、信息的度量和通信系统的主要性能指标等。为了便于读者的学习，本章对必要的数学工具——随机信号分析也做了简明的介绍。

1.1 通信与通信系统

1.1.1 通信

人类社会自脱离动物界独立形成以来，信息交互一直是一个重要的生存要素。口头语言和书面文字是最基本的信息交互形式。通信则是从一地到另一地克服距离障碍进行的信息传递和交互。实现通信的方式和手段很多，从古代社会的烽火台、消息树到后来出现的驿站、旗语，以及现代社会的电报、电话、手机和因特网等，通信技术一直伴随着人类社会的进步而发展变化着。科学技术是人类的第一生产力，近现代出现了利用电磁波或光波来传递各种消息的通信方式，使信息传递迅速、准确、可靠，而且几乎不受时间和空间距离的限制，这就是我们现在关心和讨论的现代通信技术。为了更好地理解现代通信，有必要先回顾一下它的发展历史。

1. 通信发展简史

在人类社会从古代文明走向现代文明的过程中，通信一直受到人们的关注并成为率先突破的技术领域之一。以下是近代通信发展史中的一些具有里程碑意义的重大事件：

1844年，莫尔斯发明电报码，产生了利用电信号的通信方式——有线电报。

1858年，英国开始铺设越洋海底通信电缆。

1864年，麦克斯韦建立电磁场理论，预言了无线电波的存在。

1876年，贝尔发明电话。

1887年，赫兹通过实验证实了麦克斯韦的预言，为现代无线通信奠定了基础。

1896年，马可尼发明无线电报通信方式。

1906年，弗莱明发明真空二极管。

1918年，调幅无线电广播、超外差接收机问世。

1928年，奈奎斯特提出著名的采样定理。

1936年，调频无线电广播开播。

1937年，脉冲编码调制原理被发明。

1938年，电视广播开播。

1940—1945年，第二次世界大战刺激了雷达和微波通信系统的发展。

1948年，发明晶体管；香农提出了信息论，现代通信理论开始建立。

1949年，时分多路通信应用于电话。

1957年，苏联成功发射第一颗人造地球卫星。

1958年，人类发射第一颗通信卫星。

1960年，发明激光。

1961年，发明集成电路。

1962年，第一颗同步通信卫星成功发射，为国际间大容量通信奠定了基础。

1960—1970年，数字传输的理论和技術得到了迅速发展；数字电子计算机运算速度大大提高。

1970—1980年，大规模集成电路、商用通信卫星、程控数字交换机、光纤通信系统和微处理器等迅速发展。

1980年以后，超大规模集成电路、光纤通信系统得到广泛应用；综合业务数字网崛起，现代通信朝着数字化、网络化、综合化、智能化、移动化、宽带化和个人化的方向发展。

纵观现代通信技术的发展历程，人们发现通信技术来源于社会发展的需求，反过来又推动了社会的进步。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，必然带来通信技术的飞跃，同时也会进一步推动理论的发展。

2. 通信方式

通信方式是指通信双方之间的工作方式或信号的传输方式。

(1) 单工、半双工及全双工通信

对于点对点之间的通信，按消息传送的方向与时间关系，通信方式可分为单工通信、半双工通信及全双工通信3种。

单工通信是指消息只能单方向传输的工作方式。例如，遥控、遥测就是单工通信方式。单工通信信道是单向信道，发送端和接收端的身份是固定的，发送端只能发送信息，不能接收信息；接收端只能接收信息，不能发送信息。

半双工通信方式可以实现双向的通信，但不能同时在两个方向上通信，必须轮流交替进行。也就是说，通信信道的每一端都可以是发送端，也可以是接收端。但在同一时刻，信息只能朝一个方向传输。军事、工矿企业和公共管理场合使用的对讲机、步话机等通信设备采用的就是半双工通信方式。

全双工通信是指在通信的任一时刻，通信双方都可同时进行收发消息的通信方式。全双工通信的信道必须是双向信道，电话就是全双工通信最典型的例子。现在，计算机之间的高速数据传输也采用这种方式。

(2) 并行传输与串行传输

在计算机通信中，按数据代码的排列方式不同，可分为并行传输和串行传输。

并行传输是将代表信息的数字信号码元在并行信道上同时传输的方式。例如，一个字节的二进制代码字符要用8条信道同时传输，一次传一个字符，这种方式传输速度快，但由于

占用信道多、投资大，一般只用在设备之间的近距离通信，如计算机与打印机之间的通信等。

串行传输是将数字信号码元在一条信道上以位（码元）为单位，按时间顺序逐位传输的方式。这种传输方式按位发送，逐位接收，收、发双方需要确认字符，因此必须采取同步措施。速度虽慢，但由于只需一条传输信道，投资小，易于实现，所以它是目前电话和数据通信采用的主要传输方式。

(3) 点对点通信、点对多点通信与网络通信

电话通信是典型的点对点通信，通信时发送信息点与接收信息点之间必须有独立的通信信道；广播、电视是典型的点对多点通信，这种通信的信道是公用的，发布信息的一方只需将信息通过公共信道传播出去，接收信息的任何一方可根据需要有选择地接收信息；现代通信需要任意时刻任意地点之间的多点对多点的通信，因此出现了各种交换系统和网络，网络通信蓬勃发展起来，现代通信系统已经离不开网络。

1.1.2 通信系统

通信的根本目的是传输信息。在信息传输过程中所需的一切设备和硬件技术组成的综合系统称为通信系统。尽管通信系统的种类繁多、形式各异，但最基本的架构就是点对点通信系统。通信原理主要研究点对点通信系统的通信理论、通信方式和通信技术。图 1-1 给出的是一个点对点单向通信系统的一般模型。

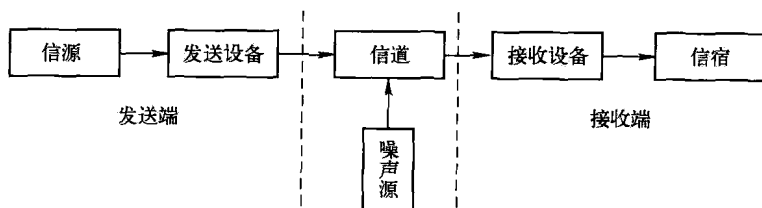


图 1-1 点对点单向通信系统的一般模型

图 1-1 中各部分的功能简述如下：

信源：信息的发源地，是消息的产生地。信源还包括把各种消息转换成原始电信号（基带信号），完成非电量到电量的转换等功能。根据消息种类的不同，信源可以分为模拟信源和数字信源，日常生活中典型的例子有话筒（语音—音频信号）、摄像机（图像—视频信号）和电传机（键盘字符—数字信号）等。

发送设备：主要功能是构造适合在信道中传输的信号，使信源信号和信道特性相匹配，并具有足够大的功率，以满足远距离传输的需要。发送设备的含义比较丰富，包括信号的变换、放大、滤波、调制和编码等各种过程。

信道：指传输信号的物理媒质。在无线信道中，信道就是自由空间；在有线信道中，信道可以是双绞线、电缆、波导或光纤等。信道同时也是一个抽象的概念，泛指信号传输的通道。实际信道除了给信号提供通路之外，还会产生各种不利信号传输的干扰和噪声，但我们把它们用另外一个概念——噪声源来描述，因此这里的信道是一种理想模型。

噪声源：是将信道中的干扰和噪声以及分散在通信系统其他各处的噪声集中表示的理想模型。

接收设备：和发送设备相对应，完成发送设备的逆功能。具体来说，就是将经过信道传输后到达接收端的信号进行放大、整理，完成解码、解调等反变换，从由于传输而受到损害的信号中恢复出正确的原始信息。

信宿：又称为收信者，信息传输最终到达的目的地。其典型的例子如扬声器和显像管等。

1. 模拟通信系统

模拟通信系统指在信道中传输模拟信号的通信系统，其系统模型可由图 1-1 略加演变而成，如图 1-2 所示。

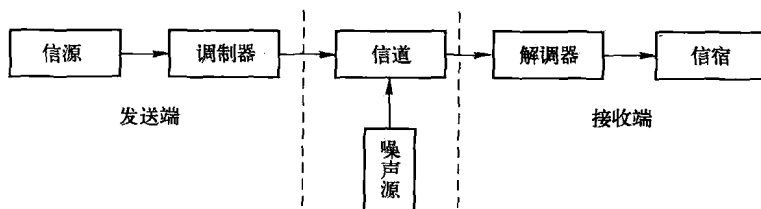


图 1-2 模拟通信系统的模型

与图 1-1 相比，发送设备换成了调制器。事实上，除了调制器外，发送设备还应包含放大、滤波、混频和辐射等各种环节，本模型认为这些环节都足够理想，从而不再讨论。调制器的主要功能是把从信源发送出来的基带信号变换成适合在信道中传输的频带信号。解调器的功能与调制器的功能相反。关于调制与解调的原理以及噪声对信号传输的影响的详细内容见第 2 章。

2. 数字通信系统

数字通信系统是利用数字信号来传递信息的通信系统。

(1) 数字通信系统模型

数字通信系统模型（见图 1-3）中各部分的主要功能如下：

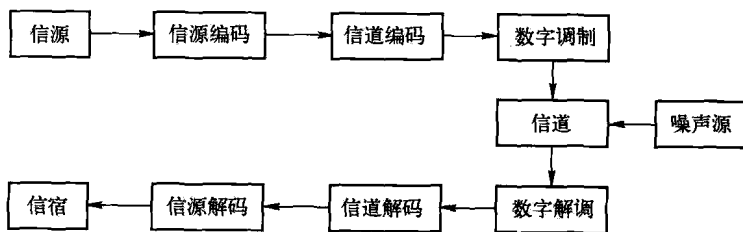


图 1-3 数字通信系统模型

信源编码：主要解决数字信号的有效传输问题，又称为有效性编码。对于模拟信号源，信源编码首先要将模拟信号转换成数字信号；对于数字信号源，这一步可以省去。信源编码的另一个重要任务是对数字信号进行数据压缩，设法降低数字信号的数据传输率。数据传输率在通信中直接影响信号的传输带宽，数据传输率越高，所需的传输带宽就越宽。单位传输带宽所能传输的信息量反应了通信的有效性，因此信源编码的目的主要是为了提高通信的有效性。

信道编码：主要解决数字信号传输的抗干扰问题，又称为可靠性编码。通过信源编码输出的数字信号，在传递过程中因为噪声或其他原因可能发生错误而造成误码。为了保证传输

正确,尽可能减少出错和误码,信道编码人为地对要传输的信息码元增加一些冗余符号,并让这些符号之间满足一定的数学规律,可使信息传输具有发现错误和纠正错误的能力,从而提高通信的可靠性。

数字调制:数字调制的任务是将数字基带信号经过调制变为适合于信道传输的频带信号(带通信号),其实质就是对数字信号进行频谱搬移的过程。数字调制的方法有多种,将在第5章详细讨论。在传输距离不太远且通信容量不太大的某些系统中,也可以直接传输数字基带信号,这时可以省去数字调制的过程。

数字解调:数字解调是数字调制的逆过程,它将频带信号还原为原始的基带信号。

信道解码:信道解码是信道编码的逆过程。

信源解码:信源解码是信源编码的逆过程。

(2) 数字通信系统的主要特点

由于计算机技术的突飞猛进,数字通信的发展速度已明显超过模拟通信,成为现代通信技术的主流,这是因为数字通信与模拟通信相比,具有以下优点:

1) 在传输中噪声不积累,抗干扰能力强。

2) 传输差错可控,通信质量高。

3) 可以采用现代数字信号处理技术对信息进行加工、处理,易于存储并能灵活地与各种信源综合到一起传输。

4) 采用集成电路后,通信设备可实现微型化。

5) 易于对传输信息进行加密处理,保密性好。

但是,事物总是一分为二的,数字通信的许多优点都是以比模拟通信占据更宽的系统频带为代价而换取的。以电话通信为例,一路模拟电话通常只占据4kHz带宽,但一路接近同样语音质量的数字电话可能要占据20~60kHz的带宽,因此数字通信的频带利用率比模拟通信低。数字通信的另一个缺点是对同步的要求高,系统设备比较复杂。但是,随着微电子技术、计算机技术和通信技术的进步和发展,这些缺点正在不断被克服,数字通信的优势将越来越彰显,因此,本书也把重点放在对数字通信原理与技术的介绍上。

3. 通信系统的分类

(1) 按通信业务分类

按通信业务可分为语音通信和非语音通信。

语音通信的电话业务在电信领域一度占主导地位,但现在非语音的数据通信大有后来居上的趋势。非语音业务包括电报、数据、图像和视频等,具体有分组数据业务、计算机通信、数据库检索、电子邮件、电子数据交换、可视图文及会议电视等。它们互相独立,也可以兼容和并存,已经出现的综合业务数字网能使各种业务统一在一个通信网中传输。

(2) 按调制方式分类

根据是否进行调制,可将通信系统分为基带传输系统和频带传输系统。

基带传输是将信源的原始基带信号直接传送的系统。频带传输是对基带信号调制后再传输的数字系统。

(3) 按传输信号的特征分类

根据信道传输的电信号的种类,可以把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

(4) 按传送信号的复用方式分类

在同一信道上传送多路信号时要依靠复用方式。常用的复用方式有频分复用 (FDM)、时分复用 (TDM)、码分复用 (CDM) 和波分复用 (WDM) 等。其中, 频分复用主要用于传统的载波通信, 时分复用广泛用于数字微波通信和移动通信, 码分复用主要用于扩频通信和数字移动通信。波分复用主要用于光纤通信。卫星通信中还有空分复用 (SDM) 等方式。

(5) 按传输媒质分类

传输媒质指的是通信系统收、发两端之间的物理路径。根据媒质的种类, 可以将通信系统分为有线通信系统和无线通信系统。有线通信系统包括载波、电缆和光纤通信系统; 无线通信系统有调幅、调频广播、电视、移动通信、空间遥测、雷达导航、微波中继和卫星通信系统等。

各种传输媒质有其特定的工作频率, 现将常用传输媒质的频率范围及用途列于表 1-1。

表 1-1 常用传输媒质的频率范围及用途

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

1.2 信息与信息的量度

1.2.1 信息、信号与消息

在日常生活中, 我们经常会用到信息、信号和消息等不同的名词概念。在许多场合, 这些概念被互相替换和混用, 一般人并不去深究其中的差异和区别。但严格地讲, 这 3 个概念各有其不同的内涵和外延。为便于读者更好地理解通信原理的基本内容, 有必要对它们之间

的区别和联系进行探讨。

消息 (Message): 指通信过程中被传输的具体内容, 但只是一种泛指, 是一个总体的概念。消息有多种形式, 如语音、图像、视频、数据、文字、图片和符号等。消息中包含的对受信者真正有用的内容才是信息。

信息 (Information): 是一个抽象的概念, 指消息中对受信者有意义的内容, 或者说是对受信者来说未知的那些内容。广义的信息是任何事物的运动状态以及运动状态的变化, 它是一种客观存在, 与我们主观的感受无关。狭义的信息指信息接收主体所感觉到并能够被理解的东西。按照信息论的奠基人香农 (Shannon) 的解释, 信息就是“不确定性的减少”。和物质、能量一样, 信息已被公认为人类社会生存与发展的不可缺少的第三类资源。

信号 (Signal): 是承载消息的物理载体, 或者说是消息的具体传输形式。在现代通信系统中, 信号通常指电流或电压形式的电信号 (光信号也常常被转换成电信号), 因此可以用数学表达式来进行描述。当信号为时间的连续函数时, 我们称这种信号为模拟信号; 当信号只在离散的时间点上有值, 并且这些取值都被数字化编码时, 我们称它们为数字信号。

在接下来的讨论中, 先对信息和信息的量度给出严格的定义和计算方法, 以便后面阐述通信的基本原理时, 可以以具体的信号作为分析研究的对象, 读者应根据上下文去领会这些概念在文中的确切含义。

1.2.2 信息的量度

通过前面的介绍, 我们知道, 信源发出来的是消息, 而对于受信者来说, 只有信息才是有用的东西。因此, 如何来界定通信的意义和价值, 其实质就是如何来衡量受信者在通信中获得的信息的多少。如同运输货物的多少需要采用“货运量”来描述一样, 对信息传输的多少也需要一个能够定量计算的度量单位, 这就是“信息量”的概念。

经验告诉我们, 实际生活中某个事件是否会发生常常是不确定的, 发生的可能性有大有小。对于发生可能性大的事件, 在这类事件出现后, 人们一点都不感到惊奇; 相反, 对于发生可能性极小的某个事件, 一旦它真的出现了, 人们会感到十分惊奇。为何会有如此大的差别呢? 因为, 在后一种情况下, 人们得到很多信息, 而在前一种情况下, 人们未得到多少信息。

事件的不确定程度可以用其出现的概率来描述。某一消息发生的概率越小, 它所包含的信息量越大。反之, 某一消息发生的概率越大, 它所包含的信息量就越小。一个已经众所周知的消息, 或者说, 一个完全确定的事件, 其信息量等于零。因此, 信息量应该是消息出现概率的单调递减函数。

如果收到的不只是一个消息, 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, 这就意味着信息量还应满足相加性的条件。

基于以上分析, 可以按如下公式定义消息的信息量:

假定某事件 x_i 发生的概率为 $P(x_i)$, 则事件 x_i 所含的信息量为

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

式中, 信息量 $I(x_i)$ 的单位与对数的底 a 有关。如取 $a=2$, 则信息量的单位为比特 (bit); 如取 $a=e$, 则信息量的单位为奈特 (nat); 如取 $a=10$, 则信息量的单位为哈特莱 (Hartley)。

比特 (bit) 是最常用的信息量单位。因此, 信息量的一般表达式可写成

$$I(x) = \log_2 \frac{1}{P(x)} = -\log_2 P(x) \quad (1-2)$$

按照式 (1-2) 单个事件的信息量的定义, 我们先来讨论等概率离散信源的信息量。

设二进制离散信源 (0, 1) 以相等的概率发送符号“0”和“1”, 每个符号的发送与前面已经发送过的符号无关, 即每个符号的发送是独立的。由于发送符号“0”和发送符号“1”的概率相等, 因此 $P(0) = P(1) = P(x) = 1/2$, 故发送一个符号的信息量为

$$I(x) = \log_2 \frac{1}{P(x)} = \log_2 2\text{bit} = 1\text{bit}$$

这就是说, 等概率离散信源 (0, 1) 每传送一位二进制数波形, 它所包含的信息量为 1bit。因此, 我们习惯把一个二进制码元称作 1bit。同理, 传送等概率的四进制数波形之一 ($P=1/4$) 的信息量为 2bit, 恰好是二进制数每一波形所含信息量的 2 倍, 因为每一个四进制波形需要用两个二进制脉冲来表示。由此推理, 如果离散信源的 M 个波形以等概率 ($P=1/M$) 发送, 且每一个波形的出现是独立的, 则传送 M 进制波形之一的信息量为

$$I(x) = \log_2 \frac{1}{P(x)} = \log_2 \frac{1}{1/M} = \log_2 M \quad (1-3)$$

若 M 是 2 的整数次幂, 即 $M=2^k$ ($k=1, 2, 3, \dots$), 则式 (1-3) 可进一步写为

$$I = \log_2 M = \log_2 2^k = k \quad (1-4)$$

也就是说, 传送每一个 M ($M=2^k$) 进制波形的信息量就等于用二进制脉冲表示该 M 进制脉冲所需的脉冲数目 k 。

一般情况下, 离散信源各符号出现的概率并不一定相等, 这时, 每一个单一符号的信息量也各不相同。设离散信源是一个由 M 个符号组成的集合, 其中每个符号 x_i ($i=1, 2, 3, \dots, M$) 按概率 $P(x_i)$ 独立出现, 且有 $\sum_{i=1}^M P(x_i) = 1$, 则各符号 x_1, x_2, \dots, x_M 所包含的信息量分别为

$$-\log_2 P(x_1), -\log_2 P(x_2), \dots, -\log_2 P(x_M)$$

【例 1-1】据统计, 一般的文字材料中, 26 个英文字母出现的概率见表 1-2, 英文字母 e 出现的概率最大, q 出现的概率最小, 试计算这两个字母各自出现时的信息量。

表 1-2 英文字母在文字材料中出现的概率

符号	$p(x)$	符号	$p(x)$	符号	$p(x)$
空格	0.2	s	0.052	y, w	0.012
e	0.105	h	0.047	g	0.011
t	0.072	d	0.035	b	0.0105
o	0.0654	i	0.029	v	0.008
a	0.063	c	0.023	k	0.003
n	0.059	f, u	0.0225	x	0.002
l	0.055	m	0.021	j, q, z	0.001
r	0.054	p	0.0175		

解: 由表 1-2 可知, 字母 e 出现的概率 $P(e) = 0.105$, 故 e 出现的信息量

$$I(e) = -\log_2 P(e) = -\log_2 0.105 \approx 3.25 \text{ bit}$$

字母 q 出现的概率 $P(q) = 0.001$, 故 q 出现的信息量

$$I(q) = -\log_2 P(q) = -\log_2 0.001 \approx 9.97 \text{ bit}$$

以上计算的是各个符号单独出现时的信息量。在实际应用场合中, 我们往往需要计算信源的平均信息量, 由于各个符号出现的概率不同, 因此信源的平均信息量应该是各个符号所含信息量的统计平均值, 即各个单一符号出现的信息量的加权平均, 即

$$\begin{aligned} H(x) &= P(x_1) [-\log_2 P(x_1)] + P(x_2) [-\log_2 P(x_2)] + \cdots + P(x_M) [-\log_2 P(x_M)] \\ &= -\sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) \end{aligned} \quad (1-5)$$

我们把 $H(x)$ 称为离散信源的平均信息量。由于 $H(x)$ 同热力学中的熵的形式具有相同的数学表示, 故通常又称它为信息熵, 其单位为 bit/符号。

可以证明, 当信源中每个符号都等概率独立出现时, 此时信源的信息熵最大。这时, 信息熵的计算十分简单, 即

$$H = -\sum_{i=1}^M \frac{1}{M} \log_2 \frac{1}{M} = \log_2 M \quad (1-6)$$

仔细想想, 式 (1-6) 的结论是顺理成章的, 因为只有当各个符号等概率出现时, 我们才最难确定下一个将轮到哪个符号出现。也就是说, 这时的不确定性最大, 因此平均信息量也就最大。

【例 1-2】 一离散信源由 A、B、C、D 4 种符号组成, 设每个符号的出现各自独立。

(1) 当这 4 种符号出现的概率分别为 $\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{3}{8}$ 时, 求该信源的信息熵。

(2) 当 4 种符号等概率出现时, 再求该信源的信息熵。

解: (1) 4 种符号不等概率出现时, 信源的信息熵为

$$\begin{aligned} H(x) &= -\sum_{i=1}^4 P(x_i) \log_2 P(x_i) \\ &= -\frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} - \frac{3}{8} \log_2 \frac{3}{8} \\ &\approx (0.5 + 0.5 + 0.375 + 0.53) \text{ bit/符号} \\ &\approx 1.91 \text{ bit/符号} \end{aligned}$$

(2) 当 4 种符号等概率出现时, 信源的信息熵最大, 为

$$H = \log_2 M = \log_2 4 = 2 \text{ bit/符号}$$

对于由一串符号构成的消息, 可根据信息相加性概念计算整个消息的信息量。

【例 1-3】 已知某四进制离散信源, 其符号出现的概率分别为 $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \frac{1}{8}$, 且相互独立, 求信源发送 13201010100201300200100210300101020010030103210 消息时的信息量。

解: 在信源发出的这个消息中, 0 出现了 24 次, 1 出现了 12 次, 2 出现 6 次, 3 出现 5 次, 共计 47 个符号, 故该消息序列的信息量为

$$I = -24 \log_2 \frac{1}{2} - 12 \log_2 \frac{1}{4} - 6 \log_2 \frac{1}{8} - 5 \log_2 \frac{1}{8} = 81 \text{ bit}$$

也可以用熵的概念来计算, 先计算信息熵, 有

$$\begin{aligned}
 H(x) &= - \sum_{i=1}^M P(x_i) \log_2 P(x_i) = - \frac{1}{2} \log_2 \frac{1}{2} - \frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} - \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} \\
 &= \left(\frac{1}{2} \times 1 + \frac{1}{4} \times 2 + \frac{1}{8} \times 3 + \frac{1}{8} \times 3 \right) \text{bit/符号} = 1.75 \text{bit/符号}
 \end{aligned}$$

该序列的信息量约为 $I = 47 \times 1.75 \text{bit} = 82.25 \text{bit}$ 。

虽然两种计算结果有一定的误差，但当序列很长时，用熵的概念计算比较方便。而且随着数字序列长度的增加，两种计算的误差将趋于零。

以上讨论的是离散、相互独立消息的离散信源平均信息量的定义和计算方法。对于连续消息信源的信息量，可以用概率密度函数的加权积分来描述和计算。限于本书的篇幅，这里不再赘述。

1.3 信道及信道容量

信道，顾名思义，是指以传输媒质为基础的信号通路。通常，我们将仅指信号传输媒质的信道称为狭义信道。按媒质的不同，狭义信道通常可分为有线信道和无线信道。所谓有线信道，是指传输媒质为双绞线、对称电缆、同轴电缆、光缆及波导等一类具体的物理媒质。无线信道则是肉眼看不到的媒质，它泛指能够传播电磁波的各种空间，包括地球表面、短波电离层反射、对流层散射和地球外的深空空间等。无线信道的传输特性比较复杂，没有有线信道稳定和可靠，但无线信道具有方便和灵活等特点。现代通信系统为了实现任何地点、任何时间的可移动通信，无线信道已经成为人类非常重要的通信媒质。

从研究信息传输的观点看，我们所关心的只是通信系统中的基本问题，因而可以根据所研究的问题将信道的范围扩大。除了传输媒质外，还可以包括有关的传输部件和电路，如天线、馈线、调制器、解调器、混频器和功率放大器等。这种扩大了范围的信道称为广义信道。在讨论通信的一般原理时，常采用广义信道的概念。

广义信道也可分成两种：**调制信道**和**编码信道**。

调制信道从研究调制与解调的基本问题出发，它所指的范围是从调制器输出端到解调器输入端。图 1-2 所示的模拟通信系统的模型中的信道就是调制信道，因此调制信道又称为模拟信道。因为从调制和解调的角度看，我们只关心解调器输出的信号形式和解调器输入信号与噪声的最终特性，并不关心信号的中间变化过程。因此，定义调制信道对于研究调制与解调问题是方便和恰当的。

在数字通信系统中，如果仅着眼于研究编码和译码问题，则可得到另一种广义信道。这是因为，从编码和译码的角度看，编码器的输出仍是某一数字序列，而译码器输入同样也是一数字序列，它们在一般情况下是相同的数字序列。因此，从编码器输出端到译码器输入端的所有转换器及传输媒质可以看作一种广义信道，这种广义信道称为**编码信道**。由于编码信道的输入和输出都是数字信号，因此编码信道又称为**数字信道**。

图 1-4 所示的通信系统模型，将调制信道和编码信道的范围分别用虚线表示出来，读者可以从中学会这两种广义信道的不同含义。

1.3.1 信道的数学模型

为了分析信道的一般特性及其对信号传输的影响，还要进一步建立信道的数学模型。