



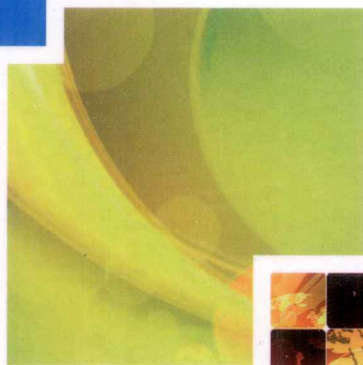
工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

蒋青 于秀兰 范馨月 编著
刘光明 主审

通信原理 (第3版)

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

Communication Principles (3rd Edition)



 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

蒋青 于秀兰 范馨月 编著
刘光明 主审

通信原理 (第3版)

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

Communication Principles (3rd Edition)

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 / 蒋青, 于秀兰, 范馨月编著. — 3版

— 北京: 人民邮电出版社, 2011. 9

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材

ISBN 978-7-115-25493-1

I. ①通… II. ①蒋… ②于… ③范… III. ①通信理论—高等学校—教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第150701号

内 容 提 要

本书系统地介绍通信的基本概念、基本理论和基本分析方法。在保持一定理论深度的基础上, 本书尽可能简化数学分析过程, 突出对概念、新技术的介绍; 叙述上力求概念清楚、重点突出、深入浅出、通俗易懂; 内容上力求科学性、先进性、系统性与实用性的统一。

本书共 10 章, 内容包括: 绪论、信号与噪声分析、模拟调制系统、模拟信号的数字传输、数字信号的基带传输、数字信号的载波传输、现代数字调制技术、信道、信道编码和扩频通信。内容涵盖国内通信原理教学的全部基本内容, 每章配有例题和习题, 且书末附有习题参考答案。

本书可作为高等学校电子、通信类及其相关专业的本科生教材, 也可供相关工程技术人员参考。

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材

通信原理 (第 3 版)

◆ 编 著 蒋 青 于秀兰 范馨月

主 审 刘光明

责任编辑 刘 博

◆ 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>

三河市海波印务有限公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 21

字数: 512 千字

2011 年 9 月第 3 版

2011 年 9 月河北第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-25493-1

定价: 39.00 元

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

反盗版热线: (010)67171154

人类进入现代社会后,社会的分工与协作越来越密切,呈现大生产的特征,国民经济各部门、各行业、各环节之间日渐形成一个相互依存、制约、影响的有机整体。而信息成为这个整体的“神经系统”,深刻地影响着社会的运行效率。由于人类在经历农业、工业社会之后,开始进入信息社会。信息的采集、加工处理、存储、传递和交换的过程,主要依靠现代通信技术、计算机技术为之实现。庞大的通信网、计算机网、广播电视节目网的兼容结合,成为信息社会的物质支柱和社会经济发展、社会进步的“倍增器”。20世纪后期以来,许多国家和地区十分重视由工业化向信息化过渡的研究,积极投入巨资建设国家、地区和全球范围的信息基础设施。

在此形势下,高等学校肩负着培养信息网络研究、设计、运行、维护、业务开发的高级技术人才的重任。“通信原理”是电子、信息工程、自控类及其相近专业的主干技术基础课程之一,重在介绍各种现代通信系统的基本原理和分析计算方法,为后续课程奠定坚实的通信理论基础。这些基本理论和分析方法将在信息化带动工业化的各个领域中得到广泛的应用。

《通信原理(第3版)》是在前两版的基础上,根据使用院校老师的参考意见及教学实践,加以修订和完善的。在保持第2版特色的基础上,根据近年来电子信息技术的新技术以及注重学生能力培养,加强基础和拓宽专业的新要求,对部分章节进行了较为细致的加工,减少过时的通信技术并增加新型通信技术原理的介绍,做到经典内容与新增内容的有机结合,同时进一步扩充了各章的习题数量。

本书参考学时为64~80学时。主要内容包括模拟通信和数字通信,侧重数字通信。全书共10章。由于“信息论基础”、“信号检测与估计”、“编码理论基础”等已单独开设了选修课,因此有关这方面的内容在本书中只做简要介绍。

本书由蒋青担任主编,并编写第1章、第2章、第3章、第5章、第6章、第8章;于秀兰编写第4章、第7章、第9章;范馨月编写第10章。全书由蒋青统稿。

重庆邮电大学刘光明教授担任主审,对本书进行仔细审阅,提出了许多宝贵意见和修改建议;在编写过程中还得到了重庆邮电大学雷维嘉教授、陈善学教授和张祖凡教授等多位同行的帮助;在出版过程中得到了人民邮电出版社的鼎力支持,在此一并表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中错误难免,敬请读者批评指正。

目 录

第1章 绪论 1	2.3.2 概率分布函数和概率密度函数..... 25
1.1 引言..... 1	2.3.3 通信系统中几种典型的随机变量..... 25
1.2 通信系统的组成..... 2	2.3.4 随机变量的数字特征..... 26
1.2.1 通信系统的一般模型..... 2	2.4 随机过程的一般表述..... 28
1.2.2 模拟通信系统模型..... 3	2.4.1 随机过程的概念..... 28
1.2.3 数字通信系统模型..... 3	2.4.2 随机过程的统计特征..... 29
1.3 通信系统分类及通信方式..... 5	2.5 平稳随机过程..... 31
1.3.1 通信系统的分类..... 5	2.5.1 严平稳随机过程..... 31
1.3.2 通信方式..... 7	2.5.2 宽平稳随机过程..... 32
1.4 信息及其度量..... 8	2.5.3 各态历经性..... 32
1.5 通信系统的主要性能指标..... 9	2.5.4 平稳随机过程的自相关函数和功率谱密度..... 32
1.5.1 模拟通信系统的主要性能指标..... 9	2.6 高斯随机过程..... 35
1.5.2 数字通信系统的主要性能指标..... 10	2.6.1 高斯过程的定义..... 36
1.6 通信系统中的噪声..... 11	2.6.2 高斯过程的性质..... 36
1.7 通信系统运载信息的能力..... 12	2.6.3 一维高斯分布..... 36
1.8 通信技术的发展..... 14	2.6.4 高斯白噪声..... 38
小结..... 15	2.7 随机过程通过系统的分析..... 39
思考题..... 15	2.7.1 随机过程通过线性系统..... 39
习题..... 15	2.7.2 随机过程通过乘法器..... 42
第2章 信号与噪声分析 17	2.8 窄带高斯噪声..... 43
2.1 信号的分类..... 17	2.8.1 窄带高斯噪声的统计特征..... 43
2.1.1 确知信号与随机信号..... 17	2.8.2 正弦波加窄带高斯噪声..... 47
2.1.2 周期信号与非周期信号..... 17	小结..... 48
2.1.3 功率信号与能量信号..... 17	思考题..... 48
2.2 确知信号的分析..... 18	习题..... 49
2.2.1 周期信号的傅里叶级数..... 18	第3章 模拟调制系统 53
2.2.2 非周期信号的傅里叶变换..... 19	3.1 引言..... 53
2.2.3 周期信号的傅里叶变换..... 20	3.2 线性调制的原理..... 54
2.2.4 卷积与相关函数..... 21	3.2.1 幅度调制 (AM)..... 54
2.2.5 能量谱密度与功率谱密度..... 22	3.2.2 双边带调制 (DSB)..... 58
2.3 随机变量的统计特征..... 24	3.2.3 单边带调制 (SSB)..... 59
2.3.1 随机变量..... 24	

3.2.4 残留边带调制 (VSB)	63	4.6 差值脉冲编码调制	120
3.3 线性调制系统的解调	65	4.6.1 语音压缩编码技术简介	120
3.3.1 线性调制系统的相干解调	65	4.6.2 差值脉冲编码调制	121
3.3.2 线性调制系统的非相干解调	66	4.6.3 自适应差值脉冲编码调制	122
3.4 线性调制系统的抗噪声性能分析	67	4.7 增量调制	122
3.4.1 抗噪声性能的分析模型	67	4.7.1 增量调制的原理	122
3.4.2 相干解调的抗噪声性能	68	4.7.2 增量调制的过载特性	124
3.4.3 非相干解调的抗噪声性能	70	4.7.3 增量调制的动态编码范围	125
3.5 非线性调制系统的原理及抗 噪声性能	74	4.7.4 增量调制系统的量化信 噪比	125
3.5.1 非线性调制的基本概念	74	4.8 时分复用和多路数字电话系统	126
3.5.2 调频信号的频谱和带宽	76	4.8.1 时分复用的 PAM 系统	127
3.5.3 调频信号的产生与解调	79	4.8.2 时分复用的 PCM 系统	127
3.5.4 调频系统的抗噪声性能	81	4.8.3 TDM-PCM 信号的传输 速率	128
3.5.5 调频系统的加重技术	85	4.8.4 PCM30/32 路系统的帧 结构	128
3.6 各种模拟调制系统的比较	86	4.8.5 PCM 高次群系统	130
3.7 载波同步	87	4.8.6 时分复用系统的同步	131
3.7.1 载波同步的方法	87	4.8.7 SDH 的提出	132
3.7.2 载波同步系统的性能	90	小结	133
3.8 频分复用	91	思考题	134
小结	94	习题	134
思考题	95	第 5 章 数字信号的基带传输	137
习题	95	5.1 引言	137
第 4 章 模拟信号的数字传输	99	5.2 数字基带信号的码型和波形	138
4.1 引言	99	5.2.1 数字基带信号的码型	139
4.2 抽样	100	5.2.2 基带波形的形成	143
4.2.1 理想抽样	101	5.3 数字基带信号的功率谱密度	143
4.2.2 实际抽样	104	5.4 数字基带信号的传输与码间 串扰	147
4.3 量化	107	5.4.1 码间串扰	147
4.3.1 均匀量化	107	5.4.2 码间串扰的数学分析	147
4.3.2 非均匀量化	109	5.4.3 无码间串扰的基带传输特性	149
4.4 编码	112	5.4.4 无码间串扰的理想低通滤 波器	151
4.4.1 常用的二进制码型	112	5.4.5 无码间串扰的滚降系统	152
4.4.2 A 律 13 折线编码	113	5.5 无码间串扰基带传输系统的抗噪 声性能分析	154
4.5 脉冲编码调制系统	117		
4.5.1 脉冲编码调制 (PCM) 原理	117		
4.5.2 PCM 系统的传输速率	118		
4.5.3 PCM 系统的抗噪声性能分析	118		

5.6 最佳基带传输系统.....	157	思考题.....	216
5.6.1 匹配滤波器.....	158	习题.....	216
5.6.2 利用匹配滤波器的最佳基带 传输系统.....	160	第7章 现代数字调制技术	219
5.6.3 二元系统基于匹配滤波的最佳 接收性能.....	162	7.1 引言.....	219
5.7 眼图.....	163	7.2 改进型四相相移键控.....	219
5.8 改善数字基带系统性能的措施....	165	7.2.1 偏移四相相移键控.....	220
5.8.1 时域均衡.....	165	7.2.2 $\pi/4$ 差分四相相移键控.....	221
5.8.2 部分响应系统.....	167	7.3 恒包络连续相位频移键控.....	223
5.9 位同步.....	171	7.3.1 连续相位 2FSK.....	223
5.9.1 插入导频法.....	172	7.3.2 正交 2FSK.....	223
5.9.2 自同步法.....	172	7.3.3 MSK 信号.....	224
5.9.3 位同步系统的性能.....	173	7.3.4 GMSK 信号.....	229
小结.....	175	7.4 正交幅度调制.....	230
思考题.....	176	7.4.1 QAM 信号的表示.....	230
习题.....	177	7.4.2 MQAM 信号的产生和解调.....	232
第6章 数字信号的载波传输	181	7.4.3 MQAM 信号的频带利用率.....	232
6.1 引言.....	181	7.4.4 MQAM 信号的抗噪性能 分析.....	233
6.2 二进制数字调制原理.....	181	7.5 正交频分复用多载波调制.....	234
6.2.1 二进制幅移键控 (2ASK) ...	182	7.5.1 多载波调制技术.....	234
6.2.2 二进制频移键控 (2FSK) ...	185	7.5.2 正交频分复用技术.....	234
6.2.3 二进制相移键控 (2PSK) 和二 进制差分移相键控 (2DPSK)	189	小结.....	237
6.3 二进制数字调制系统的抗噪声 性能.....	195	思考题.....	237
6.3.1 2ASK 的抗噪声性能.....	195	习题.....	238
6.3.2 2FSK 的抗噪声性能.....	199	第8章 信道	240
6.3.3 2PSK 和 2DPSK 的抗噪声 性能.....	203	8.1 信道的定义和分类.....	240
6.3.4 二进制数字调制系统的性能 比较.....	205	8.2 信道的数学模型.....	241
6.4 多进制数字调制系统.....	207	8.2.1 调制信道的模型.....	241
6.4.1 多进制幅移键控 (MASK) ...	207	8.2.2 编码信道模型.....	241
6.4.2 多进制频移键控 (MFSK) ...	209	8.3 通信信道实例.....	242
6.4.3 多进制相移键控 (MPSK、MDPSK)	210	8.3.1 恒参信道.....	242
小结.....	215	8.3.2 随参信道.....	245
		8.4 恒参信道特性及其对信号传输的 影响.....	246
		8.5 随参信道特性及其对信号传输的 影响.....	248
		8.6 信道衰减.....	251
		小结.....	252
		思考题.....	253

习题	253	第10章 扩频通信	289
第9章 信道编码	255	10.1 引言	289
9.1 引言	255	10.2 扩频通信的基本原理	289
9.2 信道编码的基本原理	256	10.2.1 概述	289
9.2.1 信道编码的检错和纠错能力	256	10.2.2 主要工作方式	290
9.2.2 信道编码的译码方法	258	10.2.3 扩频通信的主要特点	291
9.2.3 差错控制的3种方式	259	10.2.4 扩频通信的主要性能指标	292
9.3 线性分组码	260	10.3 伪随机序列	293
9.3.1 线性分组码的编码	260	10.3.1 定义	293
9.3.2 线性分组码的译码	264	10.3.2 m 序列	294
9.3.3 完备码和汉明码	266	10.3.3 Gold码	298
9.4 循环码	267	10.4 直接序列扩频系统	299
9.4.1 循环码的码多项式	267	10.4.1 直扩系统的扩频与解扩	299
9.4.2 循环码的生成多项式和生成矩阵	268	10.4.2 直扩信号接收机抗干扰性能	301
9.4.3 循环码的检错和纠错	270	10.5 跳频系统	302
9.4.4 循环码的编码和译码	271	10.5.1 跳频系统的扩频与解扩	302
9.4.5 CRC码	273	10.5.2 跳频图案的产生	303
9.4.6 BCH码和RS码	274	10.5.3 跳频系统的抗干扰原理	304
9.5 卷积码	275	10.6 码分复用	304
9.5.1 卷积码的解析表示	275	10.6.1 正交码	304
9.5.2 卷积码的图形描述	277	10.6.2 码分复用	306
9.5.3 卷积码的译码方法	279	小结	308
9.5.4 递归型系统卷积码	281	思考题	308
9.6 纠突发差错的码	282	习题	309
9.7 Turbo码	283	附录一 英文缩写词对照表	310
9.7.1 Turbo编码	284	附录二 傅里叶变换	313
9.7.2 Turbo译码	284	附录三 贝塞尔函数表 $J_n(x)$	315
小结	285	附录四 误差函数、互补误差函数表	316
思考题	286	附录五 常用数学公式	317
习题	286	附录六 部分习题答案	318
		参考文献	328

1.1 引言

在人类社会历史的长河中，人们为满足生产和生活的需要，人与人之间进行思想情感的交流离不开信息的传递。古代的烽火台、驿站；现代的电报、电话、传真、电子信箱、广播、电视等都是传递信息的手段和方式。自然界中，人们听到、观察到的现象，可用语言、文字、图像等信息来表达、存储或传递。随着人类社会生产力的发展、科学技术的进步、全球经济一体化，信息被认为是人类社会重要的资源之一，在政治、军事、生产乃至人们的日常生活中起着十分重要的作用。谁掌握了信息，谁就拥有未来，信息是决策的基础。

近代社会，人们常将信息的传递和交换，俗称通信——异地间人与人、人与机器、机器与机器进行信息的传递和交换。通信的目的是为了获取信息。信息是人类社会和自然界中需要传递、交换、存储和提取的抽象内容。如打一次电话，甲告诉乙所不知道的消息，就说甲发出了信息；而乙在电话中得知了原来不知道的消息，就说乙得到了信息。由于信息是抽象的内容，为了传送和交换信息，必须通过语言、文字、图像和数据等将它表示出来。即信息通过消息来表示。

我们将表示信息的语言、文字、图像和数据等称为消息。消息在许多情况下是不便于传送和交换的，如语言就不宜远距离直接传送，为此需要用光、声、电等物理量来运载消息。如打电话，它是利用电话（系统）来传递消息；两个人之间的对话，是利用声音来传递消息；古代的“消息树”、“烽火台”和现代仍使用的“信号灯”等则是利用光的方式传递消息的。随着社会的发展，消息的种类越来越多，人们对传递消息的要求和手段也越来越高。

通信中消息的传送是通过信号来进行的，如电压、电流信号等。我们将运载消息的光、声、电等物理量称为信号。信号是消息的载荷者。在各种各样的通信方式中，利用“电信号”来承载信息的通信方式称之为电通信，这种通信具有迅速、准确、可靠等特点，而且几乎不受时间、空间、地点、距离的限制，因而得到了飞速发展和广泛应用。如今，在自然科学中，“通信”与“电通信”几乎是同义词。本书中的通信均指电通信。

1.2 通信系统的组成

1.2.1 通信系统的一般模型

我们把实现消息传输所需一切设备和传输媒介所构成的总体称为通信系统。以点对点通信为例,通信系统的一般模型如图 1-1 所示。

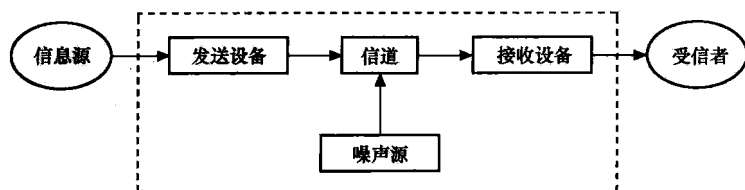


图 1-1 通信系统的一般模型

图 1-1 中,信源(信息源)的作用是把待传输的消息转换成原始电信号,该原始电信号称为基带信号。基带信号的特点是信号频谱从零频附近开始,具有低通形式。根据原始电信号的特征,基带信号可分为数字基带信号和模拟基带信号,相应地,信源也分为数字信源和模拟信源。

发送设备的基本功能是将信源产生的原始电信号(基带信号)转换成适合在信道中传输的信号。它所完成的功能很多,如调制、放大、滤波和发射等,在数字通信系统中发送设备又常常包含信源编码和信道编码等。

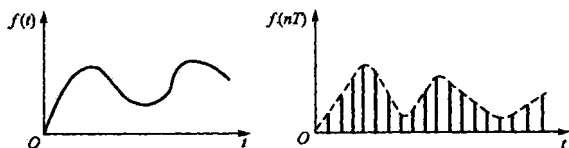
信道是指信号传输的通道,按传输媒介的不同,可分为有线信道和无线信道两大类。

通信系统还要受到系统内外各种噪声干扰的影响,这些噪声来自发送设备、接收设备和传输媒介等几个方面。图 1-1 中的噪声源,是信道中的所有噪声以及分散在通信系统中其他各处噪声的集中表示。

在接收端,接收设备的功能与发送设备相反,即进行解调、译码等。它的任务是从带有干扰的接收信号中恢复出相应的原始电信号。

信宿(也称受信者)是将复原的原始电信号转换成相应的消息,如电话机将对方传来的电信号还原成声音。

按照信号参量的取值方式及其与消息之间的关系,可将信号划分为模拟信号和数字信号。模拟信号是指代表消息的信号参量(幅度、频率或相位)随消息连续变化的信号。如代表消息的信号参量是幅度,则模拟信号的幅度应随消息连续变化,即幅度取值有无限多个。但在时间上可以连续,也可以离散。图 1-2 所示为时间连续和时间离散的模拟信号。数字信号是指在时间上和幅度取值上均离散的信号。图 1-3 所示的二进制数字信号就是以“1”和“0”两种状态的不同组合来表示不同的消息。



(a) 时间连续的模拟信号 (b) 时间离散的模拟信号

图 1-2 模拟信号

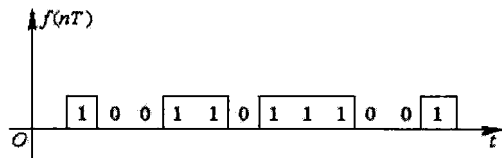


图 1-3 数字信号

1.2.2 模拟通信系统模型

传输模拟信号的系统称为模拟通信系统，如图 1-4 所示。

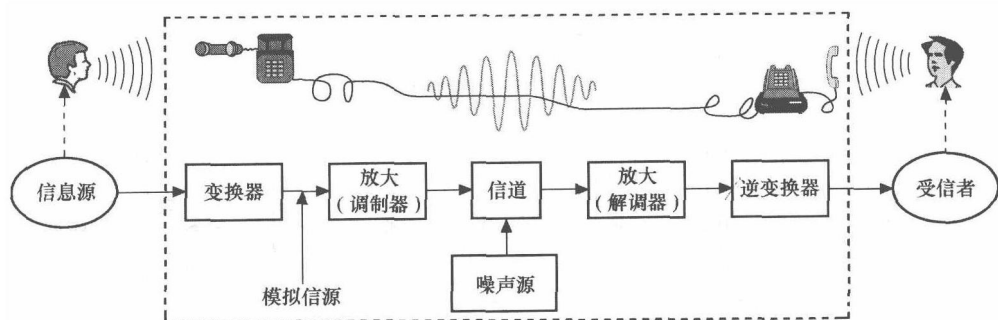


图 1-4 模拟通信系统模型

我们以语音信号为例来说明图 1-4 中模拟通信系统模型各部分的作用。

发信人讲话的语音信号首先经变换器将语音信号变成电信号，然后电信号经放大设备后可以直接在信道中传输。为了提高频带利用率，使多路信号同时在信道中传输，原始的电信号（基带信号）一般要进行调制才能传输到信道中去。调制是信号的一种变换，通常是将不便于信道直接传输的基带信号转换成适合信道中传输的信号，这一过程由调制器完成，经过调制后的信号称为已调信号。在收端，经解调器和逆变换器还原成语音信息。

实际通信系统中可能还有滤波、放大、天线辐射、控制等过程。由于调制与解调对信号的传输起决定性作用，它们是保证通信质量的关键。至于滤波、放大、天线辐射等过程对信号不会发生质的变化，只是对信号进行了放大或改善了信号特性，因而被看作是理想线性的，可将其合并到信道中去。

模拟通信系统在信道中传输的是模拟信号，其占有频带一般都比较窄，因此其频带利用率较高。缺点是抗干扰能力差，不易保密，设备元器件不易大规模集成，不能适应飞速发展的数字通信的要求。

1.2.3 数字通信系统模型

信道中传输数字信号的系统称为数字通信系统。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

信源发出的数字信号未经调制或频谱变换，直接在有效频带与信号频谱相对应的信道上传输的数字通信系统称为数字基带传输通信系统，如图 1-5 所示。

图 1-5 中基带信号形成器可能包括编码器、加密器以及波形变换等，接收滤波器亦可能包括译码器、解密器等。这些具体内容，将在第 5 章详细讨论。

2. 数字频带传输通信系统

数字频带传输通信系统如图 1-6 所示。

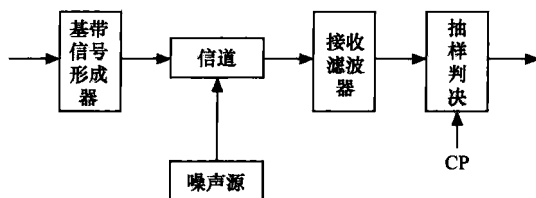


图 1-5 数字基带传输系统模型

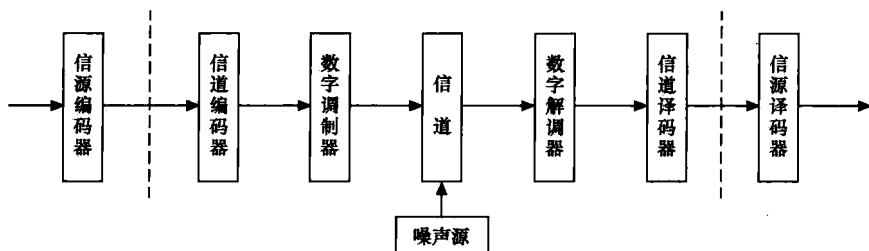


图 1-6 数字通信系统模型

信源编码器的作用主要有两个，其一是当信息源给出的是模拟信号时，信源编码器将其转换成数字信号，以实现模拟信号的数字化传输；其二就是设法用适当的方法降低数字信号的码元速率以压缩频带。信源编码的目的是提高数字信号传输的有效性。接收端信源译码则是信源编码的逆过程。

信道编码的任务是提高数字信号传输的可靠性。其基本做法是在信息码组中按一定的规则附加一些监督码元，以使接收端根据相应的规则进行检错和纠错。信道编码也称纠错编码。接收端信道译码是其相反的过程。

数字调制是把所传输的数字序列的频谱搬移到适合信道传输的频带范围内，使之适应信道传输的要求。基本的数字调制方式有幅移键控 (ASK)、频移键控 (FSK) 和相移键控 (PSK) 等。其具体内容将在第 6 章详细讨论。

数字通信系统还有一个非常重要的控制单元，即同步系统 (图 1-6 中没有画出)，它对通信系统的收、发两端或整个通信系统提供时钟同步，使接收端接收的数据流能与发送端同步，从而有序而准确地接收与恢复原信息。

3. 数字通信的主要特点

目前，无论是模拟通信还是数字通信，在不同的通信业务中都得到了广泛的应用。但是，数字通信更能适应现代社会对通信技术越来越高的要求，数字通信技术已成为当代通信技术的主流。与模拟通信相比，它有如下优点。

(1) 抗干扰、抗噪声性能好

在数字通信系统中，传输的信号是数字信号。以二进制为例，信号的取值只有两个，这样发端传输的和收端接收和判决的电平也只有两个值，如“1”码时取值为 A，“0”码时取值为 0。传输过程中由于信道噪声的影响，必然会使波形失真。在接收端恢复信号时，首先对其进行抽样判决，确定是“1”码还是“0”码，然后再生“1”，“0”码的波形。只要不影响判决的正确性，即使波形有失真也不会影响再生后的信号波形。而在模拟通信中，如果模拟信号叠加上噪声后，即使噪声很小，也很难消除它。

数字通信抗噪声性能好，还表现在数字中继通信时，它可以消除噪声积累。这是因为数字信号在每次再生后，只要不发生错码，它仍然像信源中发出的信号一样，没有噪声叠加在上面，因而中继站再多，仍具有良好的通信质量。而模拟通信随着传输距离的增大，信号受到衰减，为保证通信质量，须当信噪比尚高时，即时对信号进行放大，但不能消除噪声积累。

(2) 差错可控

数字信号在传输过程中出现的错误（差错），可通过纠错编码技术来控制。

(3) 易加密

数字信号与模拟信号相比，容易加密和解密。因此，数字通信保密性好。

(4) 数字通信设备和模拟通信设备相比，设计和制造更容易，体积更小，重量更轻。

(5) 数字信号可以通过信源编码进行压缩，以减少冗余度，提高信道利用率。

(6) 易于与现代技术相结合。

由于计算机技术、数字存储技术、数字交换技术以及数字处理技术等现代技术飞速发展，许多设备、终端接口均是数字信号，因此极易与数字通信系统相连接。正因为如此，数字通信才得以高速发展。

但是，数字通信的许多优点都是用比模拟通信占据更宽的系统频带为代价而换取的。以电话为例，一路模拟电话通常只占据 4kHz 带宽，但一路接近同样话音质量的数字电话要占 20~60kHz 的带宽，因此数字通信的频带利用率不高。另外，由于数字通信对同步要求高，因而系统设备比较复杂。不过，随着新的宽带传输信道（如光导纤维）的采用，窄带调制技术、信源编码技术和超大规模集成电路的发展，数字通信的这些缺点已经弱化。随着传输技术的发展，数字信道占用频带宽的矛盾越来越显得不成问题了。

1.3 通信系统分类及通信方式

1.3.1 通信系统的分类

按照不同的分法，通信可分成许多类别，下面我们介绍几种较常用的分类方法。

1. 按传输媒质分类

按传输媒质分，通信系统可分为有线通信系统和无线通信系统两大类。有线通信系统是用导线或导引体作为传输媒质完成通信的，如架空明线、同轴电缆、海底电缆、光导纤维、波导等。无线通信系统是依靠电磁波在空间传播达到传递信息的目的，如短波电离层传播、微波视距传播、卫星中继等。

2. 按信号的特征分类

前面已经指出，按照携带信息的信号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与数字通信系统。

3. 按工作频段分类

按通信设备的工作频段不同，通信系统可分为长波通信、中波通信、短波通信、微波通信等。表 1-1 列出了通信中使用的频段、常用传输媒质及主要用途。

表 1-1 通信频段、常用传输媒质及主要用途

频率范围	波长	符号	传输媒质	用途
3Hz~30kHz	$10^4 \sim 10^8 \text{m}$	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、时标
30~300kHz	$10^1 \sim 10^4 \text{m}$	低频 LF	有线线对 长波无线电	导航、信标、电力线通信
300Hz~3MHz	$10^2 \sim 10^3 \text{m}$	中频 MF	同轴电缆 短波无线电	调幅广播、移动陆地通信、业 余无线电
3~30kHz	$10 \sim 10^2 \text{m}$	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
30~300MHz	1~10m	甚高频 VH	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	10~100cm	待高频 UHF	波导分米 波无线电	微波接力、卫星和空间通信、 雷达
3~30GHz	1~10cm	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
30~300GHz	1~10mm	极高频 EHF	波导毫米 波无线电	雷达、微波接力、射电天文学
$10^5 \sim 10^6 \text{GHz}$	$3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-6} \text{cm}$	紫外 可见光红外	光纤激光 空间传播	光通信

表 1-1 中, 工作波长和频率的换算公式为

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{f} \quad (1.3-1)$$

式 (1.3-1) 中, λ 为工作波长 (m), f 为最高工作频率 (Hz), c 为光速 (m/s)。

4. 按调制方式分类

根据信道中传输的信号是否经过调制, 可将通信系统分为基带传输系统和频带 (调制) 传输系统。基带传输是将没有经过调制的信号直接传送, 如音频市内电话; 频带传输是对基带信号调制后再送到信道中传输。常用的调制方式及相关理论将在本书第 3 章、第 6 章和第 7 章中详细介绍。

5. 按通信业务类型分类

根据通信业务类型的不同, 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。

6. 按信号复用方式分类

按信号复用方式, 通信系统又可分为频分复用 (FDM) 通信系统、时分复用 (TDM) 通信系统和码分复用 (CDM) 通信系统等。频分复用通信系统是用频谱搬移的方式使不同信号占据不同的频率范围; 时分复用通信系统是用抽样或脉冲调制方式使不同信号占据不同的时间间隙; 码分复用通信系统则是用相互正交的码型来区分多路信号。传统的模拟通信中大多采用频分复用, 如广播通信。随着数字通信的发展, 时分复用通信系统得到了广泛的应用。

码分复用多用在扩频通信系统中。

1.3.2 通信方式

通信的工作方式通常有以下几种。

1. 按信息传输的方向与时间关系划分通信方式

对于点对点之间的通信，按信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。

单工通信是指信息只能单方向进行传输的一种通信工作方式，如图1-7(a)所示。单工通信的例子很多，如广播、遥控、无线寻呼等。这里，信号只从广播发射台、遥控器和无线寻呼中心分别传到收音机、遥控对象和BP机上。

半双工通信方式是指通信双方都能收发信息，但不能同时进行收和发的工作方式，如图1-7(b)所示。无线对讲机、收发报机等都是这种通信方式。

全双工通信是指通信双方可同时进行双向传输信息的工作方式，如图1-7(c)所示。普通电话、计算机通信网络等采用的就是全双工通信方式。

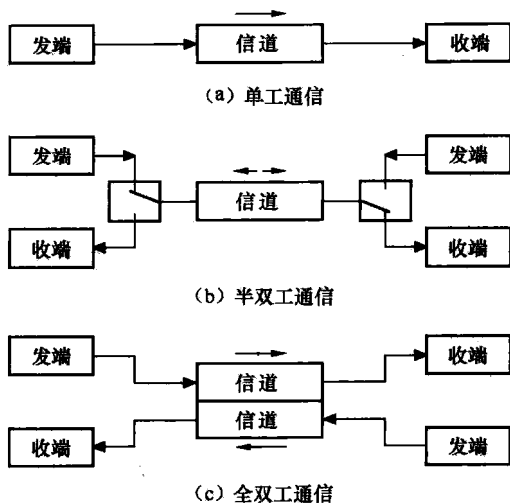


图1-7 通信方式示意图

2. 按数字信号码元排列方式划分通信方式

在数字通信中按照数字码元排列顺序的方式不同，可将通信方式分为串行传输和并行传输。

并行传输是将代表信息的数字信号码元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，则称为并行传输通信方式，如图1-8(a)所示。并行传输的优点是速度快、节省传输时间，但需占用频带宽，设备复杂，成本高，故较少采用，一般适用于计算机和其他高速数字系统，特别适用于设备之间或设备内部的近距离通信。

串行传输是将代表信息的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，如图1-8(b)所示。通常，一般的远距离数字通信都采用这种传输方式。

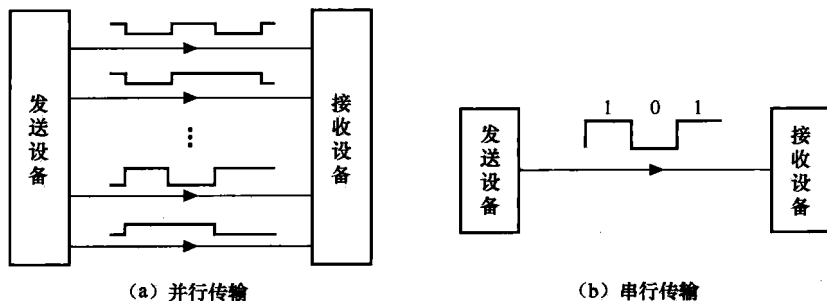


图1-8 并行和串行通信方式

3. 按照网络结构划分通信方式

通信系统按照网络结构可分为线型、星型、树型、环型等类型。专门为两点之间设立传输线的通信称之为点对点通信。多点间的通信属于网通信。网通信的基础仍是点对点通信。因此,本书重点讨论点对点通信的原理。

1.4 信息及其度量

通信的目的在于信息的传递和交换。人们常将语言、文字、图像和数据等信息的传递俗称消息的传递。信息与消息在概念上相近,但信息一词对通信来说,更贴切、更具普遍性,信息可理解为消息中所含有的特定内容。各种各样的消息,其中有意义的特定内容,均可用信息一词来表述。如铁路系统运送货物量多少采用“货运量”(不管运送什么货物)来度量,通信系统中传输信息的多少采用“信息量”来度量。当人们在通信中获得消息之前,对它的特定内容有一种“不确定性”,事件的不确定程度只能就其出现的概率来描述。

信息量与消息的种类、特定内容及重要程度无关,它仅与消息中包含的不确定度有关。也就是说消息中所含信息量与消息发生的概率密切相关。消息发生概率愈小,愈使人感到意外和惊奇,则此消息所含的信息量愈大。例如,一方告诉另一方一件几乎不可能发生的消息包含的信息量比可能发生的消息包含的信息量大。如果消息发生的概率趋于零(不可能事件),则它的信息量趋于无穷大;如果消息发生的概率为1(必然事件),则此消息所含的信息量为零。

在信息论中,消息所含的信息量 I 与消息 x 出现的概率 $P(x)$ 的关系式为

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

I 代表两种含义:当事件 x 发生以前,表示事件 x 发生的不确定性;当事件 x 发生以后,表示事件 x 所含有(或所提供)的信息量。

信息量的单位由对数底 a 的取值决定。若对数以2为底时单位是“比特”(bit—binary unit的缩写);若以 e 为底时单位是“奈特”(nat—nature unit的缩写);若以10为底时单位是“哈特”(Hart—Hartley的缩写)。通常采用“比特”作为信息量的实用单位。

【例 1.4.1】 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。

解: 英文字母 E 出现的概率为 $P(E)=0.105$,其信息量为

$$I_E = \log_a \frac{1}{P(E)} = -\log_a 0.105 = 3.25\text{bit}$$

字母 x 出现的概率为 $P(x)=0.002$,其信息量为

$$I_x = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a 0.002 = 8.97\text{bit}$$

上面我们讨论了信源发单一离散消息所携带的信息量。实际上离散信源(或消息源)发出的并不是单一消息,而是多个消息(或符号)的集合。例如,经过数字化的黑白图像信号,每个像素可能有256种灰度,这256种灰度可用256个不同的符号来表示。在这种情况下,我们希望计算出每个消息或符号能够给出的平均信息量。

设离散信息源是一个由 n 个符号组成的集合, 称符号集。符号集中的每一个符号 x_i 在消息中是按一定概率 $P(x_i)$ 独立出现的, 又设符号集中各符号出现的概率为

$$\left[\begin{array}{cccc} x_1, & x_2, & \cdots, & x_n \\ P(x_1), & P(x_2), & \cdots, & P(x_n) \end{array} \right], \text{ 且有 } \sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$$

则 x_1, x_2, \dots, x_n 所包含的信息量分别为 $-\log_2 P(x_1), -\log_2 P(x_2), \dots, -\log_2 P(x_n)$ 。于是, 该信源每个符号所含信息量的统计平均值, 即平均信息量为

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \quad (\text{bit/符号}) \quad (1.4-2)$$

由于 H 同热力学中熵的定义式类似, 故通常又称它为信息源的熵, 其单位为 bit/符号。

由式 (1.4-2) 可知, 不同的离散信息源可能有不同的熵值。可以证明, 当离散信源的每一符号等概率出现时, 即 $P(x_i) = 1/n$ ($i=1, 2, \dots, n$), 此时的熵最大。最大熵值为 $\log_2 n$ (bit/符号)。

【例 1.4.2】 某信息源的符号集由 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 $1/4, 1/8, 1/8, 3/16$ 和 $5/16$ 。试求该信息源符号的平均信息量。

解: 该信息源符号的平均信息量为

$$\begin{aligned} H(x) &= -\sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i) \\ &= -\frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - 2 \times \frac{1}{8} \log_2 \frac{1}{8} - \frac{3}{16} \log_2 \frac{3}{16} - \frac{5}{16} \log_2 \frac{5}{16} = 2.23 \text{ bit/符号} \end{aligned}$$

以上我们讨论了离散消息的度量。类似, 关于连续消息的信息量可用概率密度来描述。可以证明, 连续消息的平均信息量 (相对熵) 为

$$H_c(x) = -\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \log_a f(x) dx \quad (1.4-3)$$

式中 $f(x)$ 是连续消息出现的概率密度。有兴趣的读者, 可参考信息论有关专著。

1.5 通信系统的主要性能指标

设计和评价一个通信系统, 往往要涉及到许多性能指标, 如系统的有效性、可靠性、适用性、经济性及使用维护方便性等。这些指标可从各个方面评价通信系统的性能, 但从研究信息传输方面考虑, 通信的有效性和可靠性是通信系统中最主要的性能指标。

所谓有效性, 是指消息传输的“速度”问题, 而可靠性主要是指消息传输的“质量”问题。在实际通信系统中, 对有效性和可靠性这两个指标的要求经常是矛盾的, 提高系统的有效性会降低可靠性, 反之亦然。因此在设计通信系统时, 对两者应统筹考虑。

1.5.1 模拟通信系统的主要性能指标

模拟通信系统的有效性指标用所传信号的有效传输带宽来表征。当信道容许传输带宽一定, 而进行多路频分复用时, 每路信号所需的有效带宽越窄, 信道内复用的路数就越多。显然, 信道复用的程度越高, 信号传输的有效性就越好。信号的有效传输带宽与系统采用的调制方法有关。同样的信号用不同的方法调制得到的有效传输带宽是不一样的。