



本书赠送电子教案

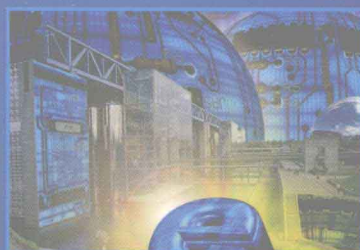


普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校通信与信息专业规划教材

通信原理

第2版

PRINCIPLES OF COMMUNICATIONS



沈越泓 高媛媛 魏以民 等编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校通信与信息专业规划教材

通 信 原 理

第 2 版

沈越泓 高媛媛 魏以民 等编著



机械工业出版社

本书在模块级、系统级层次上,系统全面地阐述了通信系统的原理。除包括通信系统原理的主体内容、习题和部分习题答案外,与其他同类教材相比,还有几个突出特点:(1)便于自学,即通过每章开始的引言和末尾的小结,总结性地说明了本章的学习方法、主要内容等,以期对读者学习起到一定的指导作用;(2)在习题中增加了仿真实验性内容,对加深基本概念的理解和提高学生综合运用所学知识的能力十分有益;(3)增加了新的内容,本书第7章和第11章简要介绍了目前较新的通信系统常用的数字调制技术,以及新理论、新技术的一些热点知识,它们是当前通信理论与技术的重要发展方向。

全书共分11章,内容包括:数学基础、信道、模拟通信系统、数字基带信号传输与最佳接收原理、正弦载波数字调制、现代数字调制、模拟信号的数字传输、差错控制编码、同步原理和现代数字通信理论与技术等。

本书可以作为通信与信息专业本科生教材,也可作为通信工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理/沈越泓等编著. —2版. —北京:机械工业出版社,2008.5
普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 高等院校通信与信息专业
规划教材

ISBN 978-7-111-24059-4

I. 通… II. 沈… III. 通信理论-高等学校-教材 IV. TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第066991号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:李馨馨 版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:鞠杨 责任印制:杨曦

三河市国英印务有限公司印刷

2008年9月第2版第1次印刷

184mm×260mm·25印张·618千字

0001—5000册

标准书号:ISBN 978-7-111-24059-4

定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379739 88379753

封面无防伪标均为盗版

高等院校通信与信息专业规划教材 编委会名单

(按姓氏笔画排序)

编委会主任	乐光新	北京邮电大学
编委会副主任	张文军	上海交通大学
	张思东	北京交通大学
	杨海平	解放军理工大学
	徐澄圻	南京邮电大学
编委会委员	王金龙	解放军理工大学
	冯正和	清华大学
	刘增基	西安电子科技大学
	李少洪	北京航空航天大学
	邹家禄	东南大学
	吴镇扬	东南大学
	赵尔沅	北京邮电大学
	南利平	北京信息科技大学
	徐惠民	北京邮电大学
	彭启琮	电子科技大学
秘书长	胡毓坚	机械工业出版社
副秘书长	许晔峰	解放军理工大学

出版说明

为了培养 21 世纪国家和社会急需的通信与信息领域的高级科技人才，配合高等院校通信与信息专业的教学改革和教材建设，机械工业出版社会同全国在通信与信息领域具有雄厚师资和技术力量的高等院校，组成阵容强大的编委会，组织长期从事教学的骨干教师编写了这套面向普通高等院校的通信与信息专业系列教材，并将陆续出版。

这套教材力求做到：专业基础课教材概念清晰、理论准确、深度合理，并注意与专业课教学的衔接；专业课教材覆盖面广、深度适中，不仅体现相关领域的最新进展，而且注重理论联系实际。

这套教材的选题是开放式的。随着现代通信与信息技术日新月异的发展，我们将不断更新和补充选题，使这套教材及时反映通信与信息领域的新发展和新技术。我们也欢迎在教学第一线有丰富教学经验的教师及通信与信息领域的科技人员积极参与这项工作。

由于通信与信息技术发展迅速，而且涉及领域非常宽，所以在这套教材的选题和编审中如有缺点和不足之处，诚请各位老师和同学提出宝贵意见，以利于今后不断改进。

机械工业出版社
高等院校通信与信息专业规划教材编委会

前 言

近十几年通信、计算机理论与技术的发展比人们预测的发展更加迅速，给高等院校通信专业的教学带来了很大的冲击和改革动力，教学内容、教材和教学方式必须不断改进、更新，以适应通信领域日新月异的发展。本书第1版成书以来，已有4年多时间，期间数字通信技术又有一些新的发展，要体现这些新的内容，也是本次改版的宗旨之一。

“通信原理”这门课程的教材内容、教学方法如何改，是放在通信领域的教育工作者面前的课题。我们通过十多年的“通信原理”课程的教学（包括本科、硕士研究生和博士研究生层次），认为对于这门课，本科层次的教学定位是在回答“是什么”的情况下，适当回答“为什么”的问题；硕士研究生层次的教学定位是回答“为什么”的问题；博士生层次的教学是要在了解前人解决问题的基础上，提出新问题和解决新问题，培养他们创新能力的过程。然而，在这三个层次上，“通信原理”课程的教学又具有它的共性，都要培养学生在模块级、系统级层次上去研究、分析和设计通信系统，在分析设计通信系统中所使用的工具主要是相关的数学知识，如：随机过程、数理统计等。但是，众所周知，现代计算机技术和通信技术的发展几乎是并驾齐驱，计算机不但早已成为通信系统的设计工具，同时也成为通信系统的重要组成部分。基于这一背景，我们主要力求突出如下几点：

1. 新体系。以往“通信原理”的教材主要是阐述用数学的方法分析设计通信系统和模块，没有有效地使用计算机这个现代化工具。我们在阐述传统通信理论和方法的基础上，认为可以将计算机作为通信系统和模块的“实验室”，所以在教材中有意识地加入了计算机仿真实验，使学生通过本教材的学习，不但能掌握传统的通信理论，同时通过自己动手可完成通信系统的系统级、模块级的设计型实验，从而加深对通信理论的理解，锻炼设计现代通信系统的能力。

2. 精内容。紧紧围绕本科教学大纲的要求，本着本科层次的教学定位原则，同时在教学主要是教会学生学习方法的思想指导下，精心选择了教材的内容，力争做到在有限的教学学时内，使学生通过学习本课程真正在系统级、模块级层次上，从理论和计算机仿真两个方面，掌握分析和设计通信系统的方法。

3. 易读性。为了便于自学，掌握知识的相互联系和应用所学的知识，增强学习每个知识点的目的性，在教材中的每一章的开始都有一段简短的引言，以说明本章解决什么问题，如何学习本章，以及本章学习的目标。在每一章的结尾，都对本章学习的内容给予了小结，指导学生进一步学习本章的内容，并给出一些建议。通过每一章的引言和小结，增强教材的可读性。

本教材的参考学时是80学时，全书共分11章。第1章，绪论，介绍通信原理的研究对象，给出了通信系统的组成框图与评价指标。第2章，数学基础，即随机信号分析与统计理论，介绍了分析、设计通信系统所用的数学工具。第3章，信道，介绍了常用信道，信号通过信道后产生各种失真及信道中噪声的特点，并建立信道的数学模型，为后续各章分析通信系统性能打下基础。第4章，模拟通信系统，介绍了模拟通信系统中的关键模块——调制解

调器的工作原理，并在通信系统模型的基础上，利用统计理论的方法分析了各种调制解调制度的性能。第5章，数字基带信号传输，这是一种最简单的数字传输系统，通过本章的学习使读者了解如何利用模型的方法来分析和设计数字通信系统。第6章，正弦载波数字调制，阐述了最基本的数字调制与解调方法，为学习现代数字调制技术奠定了基础。第7章，现代数字调制，介绍了现代通信系统中的调制技术。第8章，模拟信号的数字传输，为了实现用数字通信系统来传输模拟信号，首先要将模拟信号用数字信号来表示，这本质上是属于信源编码，本章介绍抽样定理、PCM（脉冲编码调制）、 ΔM （增量调制）等模拟信号数字化的方法。第9章，差错控制编码（差错控制编码、正交编码、伪随机序列等），是一类通过降低通信的有效性换取通信可靠性的具体方法。第10章，同步原理，介绍了数字通信系统正常工作时，必须建立的位同步、载波同步和帧同步的工作原理与性能。第11章，现代数字通信理论与技术简介，作为本科学生的选学内容。最后还附有 MATLAB 软件包的有关使用说明和部分习题参考答案。

本书由沈越泓编写第1~3、7（7.4、7.5节）、11章，高媛媛编写第4~6章和第7章（7.1、7.2、7.3节），魏以民编写第8~10章。沈越泓对全书进行了初稿修改和定稿，并统编全书。

在本书的编写过程中得到了解放军理工大学通信工程学院领导的关心和支持，参加编写的还有郭明喜、高猛、蒋慧娟、高宇、杨保峰、袁志钢。书稿中的图、习题的制作和录入得到研究生谢俊韬、胡光兵、张凤霞、王学彪、简伟等的帮助，在此一并表示最诚挚的感谢！

编者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 绪论 1

1.1 通信系统的组成 1

1.1.1 通信系统的一般模型 1

1.1.2 模拟通信系统模型和数字通信系统模型 2

1.2 通信系统的分类与通信方式 5

1.2.1 通信系统的分类 5

1.2.2 通信方式 7

1.3 信息及其度量 8

1.4 主要性能指标 10

1.5 通信发展简史 12

1.6 小结 14

1.7 思考题 15

1.8 习题 15

第 2 章 数学基础 17

2.1 信号系统基础 17

2.1.1 信号的分类及其典型信号 17

2.1.2 信号的几种运算 20

2.1.3 周期信号的频谱分析工具——傅里叶级数 24

2.1.4 非周期信号的频谱分析——傅里叶变换 27

2.2 概率论基础 28

2.2.1 概率 28

2.2.2 随机变量 28

2.2.3 三种常见的概率分布 30

2.3 随机过程的一般表述 32

2.3.1 随机过程的概念 32

2.3.2 随机过程的数字特征 32

2.4 平稳随机过程及其数字特征 34

2.5 高斯噪声 38

2.5.1 高斯随机过程 38

2.5.2 窄带高斯噪声、白噪声、带限白噪声 41

2.6 正弦波加窄带高斯噪声 45

2.7 随机信号通过线性系统 47

2.8 周期平稳随机过程 50

2.9 数理统计简介 51

2.9.1 信号检测准则 51

2.9.2 最大似然估计 55

2.10 小结 56

2.11 思考题 56

2.12 习题 57

2.13 仿真实验题——随机过程实验 60

第 3 章 信道 66

3.1 恒参信道 66

3.1.1 有线电信道 66

3.1.2 微波中继信道 67

3.1.3 卫星中继信道 68

3.2 随参信道 69

3.2.1 陆地移动信道 69

3.2.2 短波电离层反射信道 70

3.3 信道特性及其数学模型 72

3.3.1 恒参信道特性及其数学模型 72

3.3.2 随参信道特性及其数学模型 75

3.3.3 广义信道 78

3.4 信道容量的概念 78

3.5 小结 80

3.6 思考题 81

3.7 习题 81

3.8 仿真实验题 83

第 4 章 模拟通信系统 84

4.1 概述 84

4.1.1 调制在通信系统中的作用 84

4.1.2 调制的基本特征和分类 85

4.1.3 调制系统中讨论的主要问题和主要参数 86

4.2 幅度调制的原理 86

4.2.1 调幅 87

4.2.2 抑制载波双边带调制 88

4.2.3 单边带调制 89

4.2.4 残留边带调制 91

4.3 线性调制系统的抗噪声性能	94	5.10.2 匹配滤波器信号检测	175
4.3.1 分析模型	94	第6章 正弦载波数字调制	179
4.3.2 线性调制相干解调的抗噪声性能	95	6.1 概述	179
4.3.3 调幅信号包络检波的抗噪声性能	98	6.2 二进制数字调制原理	180
4.4 非线性调制(角调制)的原理	100	6.2.1 二进制振幅键控	180
4.4.1 角调制的基本概念	100	6.2.2 二进制频移键控	181
4.4.2 窄带调频与宽带调频	101	6.2.3 二进制相移键控	184
4.4.3 调频信号的产生与解调	105	6.3 二进制数字调制系统的抗噪声性能	186
4.5 调频系统的抗噪声性能	109	6.3.1 相干(相关)解调系统的抗噪声性能	186
4.6 各种模拟调制系统的比较	113	6.3.2 非相干解调系统的抗噪声性能	190
4.7 频分复用技术	114	6.3.3 其他解调方法	194
4.8 小结	116	6.4 二进制数字调制系统的性能比较	196
4.9 思考题	117	6.4.1 误码率	196
4.10 习题	117	6.4.2 频带宽度	197
第5章 数字基带信号传输	121	6.4.3 对信道特性变化的敏感性	198
5.1 概述	121	6.4.4 设备的复杂程度	198
5.1.1 问题的描述	121	6.5 多进制数字调制系统	198
5.1.2 数字基带信号的码型	123	6.5.1 多进制振幅键控	199
5.1.3 数字基带信号的功率谱分析	126	6.5.2 多进制频移键控	202
5.2 数字基带传输中的码间串扰和噪声	129	6.5.3 多进制相移键控	204
5.2.1 误码产生的原因	129	6.5.4 多进制差分相移键控	208
5.2.2 无码间串扰的传输特性	132	6.5.5 振幅相位联合键控系统	213
5.3 部分响应系统	137	6.6 小结	216
5.3.1 第I类部分响应波形	137	6.7 思考题	217
5.3.2 部分响应的一般形式	139	6.8 习题	217
5.4 二进制信号的最佳接收	142	6.9 仿真实验题——正弦载波数字调制	219
5.4.1 问题的描述及最佳接收机结构	142	第7章 现代数字调制	225
5.4.2 最佳接收滤波器	143	7.1 偏移(或交错)四相相移键控	225
5.4.3 最佳检测	150	7.1.1 QPSK 及其存在的问题	225
5.4.4 二进制最佳接收机性能分析	153	7.1.2 OQPSK 的调制	226
5.4.5 最佳基带传输系统	153	7.1.3 OQPSK 的功率谱	227
5.5 眼图	155	7.1.4 OQPSK 的解调及其误码性能	228
5.6 均衡技术	157	7.2 $\pi/4$ 四相相对相移键控($\pi/4$ -DQPSK)	228
5.6.1 时域均衡原理	158	7.2.1 $\pi/4$ -DQPSK 的调制、解调原理	228
5.6.2 均衡效果的衡量	161	7.2.2 $\pi/4$ -DQPSK 系统误码率	230
5.6.3 均衡器的实现与调整	163	7.3 最小频移键控、高斯最小频移键控	231
5.7 小结	166	7.3.1 连续相位的频移键控	231
5.8 思考题	166	7.3.2 最小频移键控	231
5.9 习题	167	7.3.3 高斯最小频移键控	233
5.10 仿真实验题	171	7.4 正交频分复用	234
5.10.1 数字信号的基带传输	171		

7.4.1 OFDM 系统的基本原理	234	9.5 循环码	304
7.4.2 OFDM 信号的功率谱	237	9.5.1 循环码原理	304
7.4.3 OFDM 系统参数的设计	238	9.5.2 循环码的编、解码方法	307
7.4.4 OFDM 的性能分析	239	9.5.3 缩短循环码	310
7.5 CCK 调制与解调原理	240	9.5.4 交织技术	311
7.5.1 CCK64_QPSK 调制	240	9.6 卷积码	311
7.5.2 CCK64_QPSK 解调	242	9.6.1 基本概念	311
7.5.3 CCK 的性能	243	9.6.2 卷积码的描述	312
7.6 小结	244	9.6.3 卷积码的译码	313
7.7 思考题	245	9.7 伪随机序列	314
7.8 习题	245	9.7.1 m 序列的产生	314
第 8 章 模拟信号的数字传输	246	9.7.2 m 序列的性质	316
8.1 抽样定理	246	9.7.3 m 序列的应用	317
8.1.1 低通抽样定理	246	9.8 现代编码技术	319
8.1.2 带通抽样定理	248	9.8.1 网格编码调制	319
8.2 脉冲编码调制	250	9.8.2 Turbo 编码	321
8.2.1 量化	251	9.8.3 LDPC 编码	322
8.2.2 编码和译码	260	9.9 小结	324
8.2.3 PCM 系统的抗噪声性能	268	9.10 思考题	324
8.3 脉冲编码调制的改进	269	9.11 习题	325
8.3.1 差分脉冲编码调制	269	第 10 章 同步原理	326
8.3.2 自适应差分脉冲编码调制	270	10.1 概述	326
8.4 增量调制	271	10.2 载波同步	326
8.4.1 简单增量调制	271	10.2.1 载波同步的方法	326
8.4.2 增量调制的过载特性与动态编码范围	273	10.2.2 载波同步系统的性能	331
8.4.3 增量调制系统的抗噪声性能	275	10.2.3 载波相位误差对解调性能的影响	334
8.4.4 PCM 与 ΔM 系统的比较	276	10.3 位同步 (符号同步)	335
8.5 时分复用和多路数字电话系统	278	10.3.1 位同步的方法	335
8.5.1 时分多路数字电话通信系统的组成	279	10.3.2 位同步系统的性能及其相位误差对性能的影响	339
8.5.2 数字电话系统帧结构和传码率	281	10.4 群同步 (帧同步)	342
8.5.3 数字通信系统高次群	282	10.4.1 群同步的方法	342
8.6 小结	283	10.4.2 群同步系统的性能	346
8.7 思考题	284	10.5 小结	348
8.8 习题	284	10.6 思考题	348
8.9 仿真实验题——模拟信号的数字传输	286	10.7 习题	349
第 9 章 差错控制编码	292	第 11 章 现代数字通信理论与技术简介	350
9.1 概述	292	11.1 分集技术	350
9.2 纠错编码的基本原理	294	11.2 多天线通信系统与空时信号处理	352
9.3 常用的简单编码	297	11.2.1 多天线 (MIMO) 通信系统	
9.4 线性分组码	299		

模型	353	11.7 思考题	372
11.2.2 MIMO 系统分集增益与时空信号 处理	354	11.8 习题	372
11.3 MIMO-OFDM 系统	357	11.9 仿真实验题	372
11.3.1 OFDM 演变为 MIMO-OFDM 系统	357	附录	373
11.3.2 MIMO-OFDM 系统的性能分析	361	附录 A Q 函数及其近似计算	373
11.4 现代通信系统中的信道估计	363	附录 B 仿真实验中 M 文件的说明	374
11.4.1 信道估计问题描述	363	B.1 仿真环境	374
11.4.2 信道估计方法	364	B.2 M 文件说明	375
11.5 M-QAM 系统误码率性能分析	369	附录 C CCK64_QPSK 扩频补码集	377
11.5.1 系统模型	369	附录 D 部分习题参考答案	379
11.5.2 误比特率的确切表达式	369	附录 E 二进制随机脉冲序列功率谱密度 推导	384
11.5.3 数值算例	371	参考文献	387
11.6 小结	372		

第1章 绪 论

通信原理是一门介绍信息传输基本原理（理论和技术）的课程。它的研究对象是通信系统。研究目的是利用尽可能小的通信资源，获得尽可能高的通信质量。研究方法是在系统级、模块级层次上将实际通信系统抽象成数学模型，采用数学分析和计算机模拟的方法对其进行研究，得到系统性能与系统参数之间的定量关系。在给定系统参数的情况下，估算系统的性能（系统分析）；在给定系统性能要求的情况下，设计和优化系统的参数（系统设计）。在系统的数学模型比较复杂，用数学分析方法获得系统性能与系统参数之间定量关系有困难时，可以采用计算机模拟仿真（如用 MATLAB[○]软件仿真）的方法获得这些参数之间的关系，达到优化通信系统的目的。

为了使读者明确通信原理这门课所研究的对象，本章首先介绍通信系统的基本组成、通信系统的分类；其次介绍评价通信系统的性能指标，目的就是要读者明确本书后续各章介绍的通信理论与技术都是围绕提高这些性能指标而展开的；最后介绍了通信的发展简史。通信的发展史就是如何充分利用通信资源提高通信质量的历史，通信发展史中的每一次飞跃都是以新理论、新技术的诞生为标志。从发展史中读者可以领悟到学习和研究通信理论、技术的方法——创新才能发展。

1.1 通信系统的组成

什么是通信？通信就是信息传输。从古到今，人类的社会活动总离不开信息的传递和交换，古代的消息树、烽火台和驿马传令，以及现代社会的文字、书信、电报、电话、广播、电视、遥控、遥测等，这些都是信息传递的方式或交流的手段。人们可以用语言、文字、数据或图像等不同的信号形式来表达信息。信号本身不是信息，信号是信息的载体。因此，通信的根本目的在于传输含有信息的信号，否则，就失去了通信的意义。基于这种认识，“通信”也就是“信息传输”。

实现通信的方式很多，随着社会的需求、生产力的发展和科学技术的进步，目前的通信越来越依赖利用“电”来传递信息的电通信方式。由于电通信迅速、准确、可靠且不受时间、地点、距离的限制，因而近百年来得到了迅速的发展和广泛的应用。当今，在自然科学领域涉及“通信”这一术语时，一般均是指“电通信”。广义来讲，光通信也属于电通信，因为光也是一种电磁波。本书中的通信均指电通信。

本节通过介绍通信系统的基本组成，使读者对“通信原理”这门课所研究的对象——通信系统有一个基本的了解。

1.1.1 通信系统的一般模型

通信是从一地 toward 另一地传递和交换信息。实现信息传递所需的一切设备和传输媒质的总

○ MATLAB 是美国 Math Works 公司推出的用于数值计算和信号处理的数学计算软件包。

和称为通信系统。基于点对点通信系统的模型可用图 1-1 来描述。

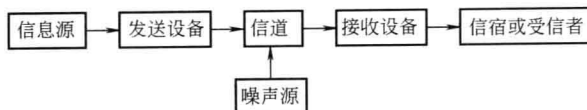


图 1-1 通信系统的一般模型

信息源简称信源是信息的产生地。由于研究的是电通信，因此信源输出是载有信息的原始电信号，原始电信号一般称为基带信号。电话机、电视摄像机和电传机、计算机等各种数字终端设备就是信源。

发送设备的基本功能是将信源和信道匹配起来，即将信源产生的原始电信号或基带信号变换成适合在信道中传输的信号。有多种变换方式，在需要频谱搬移的场合，调制是最常见的变换方式。

信道是指传输信号的物理媒质。在无线信道中，信道可以是大气（自由空间）；在有线信道中，信道可以是明线、电缆或光纤。

噪声源不是人为加入的设备，而是信道中的噪声及分布在通信系统其他各处噪声的集中表示。噪声是有害的，会降低通信的质量。

接收设备的基本功能是完成发送设备的反变换。

信宿或受信者是传输信息的归宿点，其作用是将接收设备恢复出的原始电信号转换成相应的信息。

图 1-1 概括地反映了通信系统的共性，因此称之为通信系统的一般模型。根据研究对象以及所关注问题不同，会使用不同形式的较具体的通信系统模型。后续各章的讨论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系统模型。

1.1.2 模拟通信系统模型和数字通信系统模型

图 1-1 中，信源发出的信号可以分为两类：一类称为连续信号；另一类称为离散信号。连续信号是指信号的状态连续变化或是不可数的，如语音、活动图片等。连续信号也称模拟信号。离散信号则是指信号的状态是可数的或离散的，如符号、数据等。离散信号也称数字信号。

为了传递信息，通常把信息寄托在电信号的某一参量上。

如果电信号的参量携带着模拟信息，如图 1-2 所示，这些信号就是模拟信号。

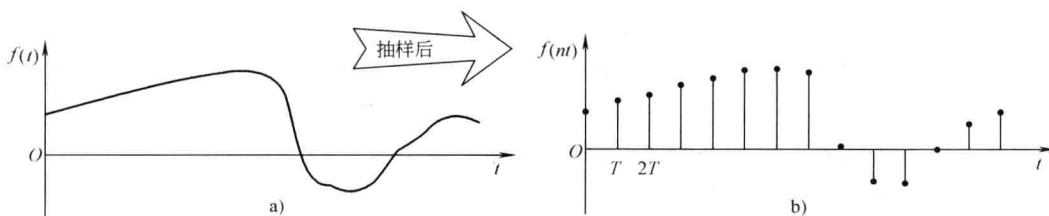


图 1-2 模拟信号波形

a) 连续信号 b) 抽样信号 (PAM 信号)

如果电信号的参量携带着数字信息，如图 1-3 所示，这样的信号就是数字信号。

按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号，可相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

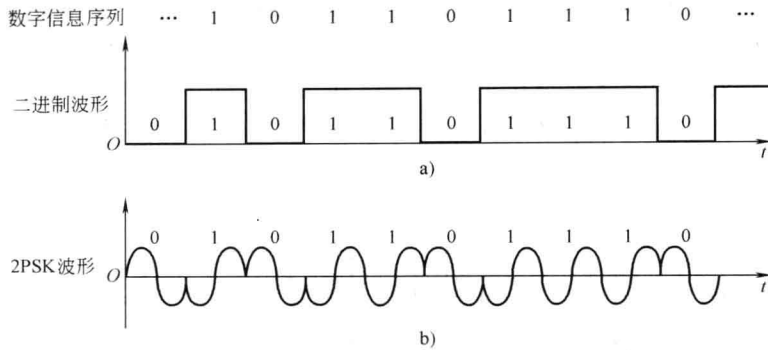


图 1-3 数字信号波形

1. 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。由于信源输出的原始电信号通常具有很低的频谱分量，一般不宜直接传输，因此常常需要进行变换。将原始电信号变换成其频带适合信道传输的信号，并在接收端进行反变换。这种变换和反变换通常称为调制和解调。经过调制后的信号称为已调信号，有三个基本特征：一是携带有信息；二是适合在信道中传输；三是信号的频谱具有带通形式且中心频率远离零频。已调信号又称频带信号。原始电信号又称基带信号，其基本特征是：频谱从零频附近开始，如语音信号为 300 ~ 3400Hz，图像信号为 0 ~ 6MHz。

需要指出，信号从发送端到接收端的传递过程中，不仅只有调制解调变换，实际通信系统中可能还有滤波、放大、天线辐射、控制等过程。本书着重研究上述调制与解调变换。

模拟通信系统模型可由图 1-1 略加演变而成，如图 1-4 所示。图中的调制器和解调器就代表图 1-1 中的发送设备和接收设备。

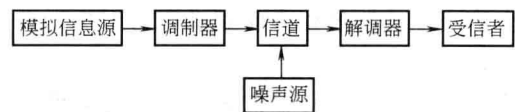


图 1-4 模拟通信系统模型

2. 数字通信系统模型

数字通信的基本特征是：它传送的信号是“离散”的或数字的。因此，与模拟通信系统相比，数字通信系统有许多特点。第一，模拟通信系统中强调调制参量与基带信号成比例，在数字通信系统中，强调已调参量与基带信号之间的一一对应。第二，数字信号传输时，由于信道噪声或干扰所造成的差错，原则上是可以控制的。这是通过差错控制编码等手段来实现的。为此在发送端需增加一个信道编码器，而在接收端相应地需要一个信道译码器。第三，当需要保密时，可以有效地对基带信号进行人为“扰乱”，即加密，此时在接收端就需要进行解密。第四，为了只传送有用的消息，需要将原始信号中的无用部分去掉，为此在发送端需增加一个信源编码器，而在接收端相应地需要一个信源译码器。第五，由于数字通信系统传输的是一个接一个按节拍传送的数字信号单元，即码元，因而接收端必须按与发送端相同的节拍接收。不然，会因收发节拍不一致而造成混乱，使接收性能变坏。在数字通信中，节拍一致称为同步，可见，数字通信中必须有一个同步子系统。

点对点数字通信系统一般可用图 1-5a 表示。图中同步子系统没有画出，因为它的位置往往是不固定的。当然，实际上的数字通信系统并非一定要如图 1-5a 所示的那样包含所有

的模块。究竟采用哪些模块，还取决于具体设计方法及要求。例如，在本书第5章中将要详细讨论的数字基带传输系统，它的模型就不包括数字调制解调器、信道编码与译码器、加密与解密器、信源编码与译码器等环节，如图1-5b所示。另外，数字通信系统传送的信息一般都是数字型的，但也可以是模拟型的。如果需要在数字通信系统中传送模拟信息，则在发送端的信息源中应当包括一个模-数转换装置，而在接收端的受信者中包括一个数-模转换装置。数字电话系统就是以数字方式传输模拟语音信号的例子。

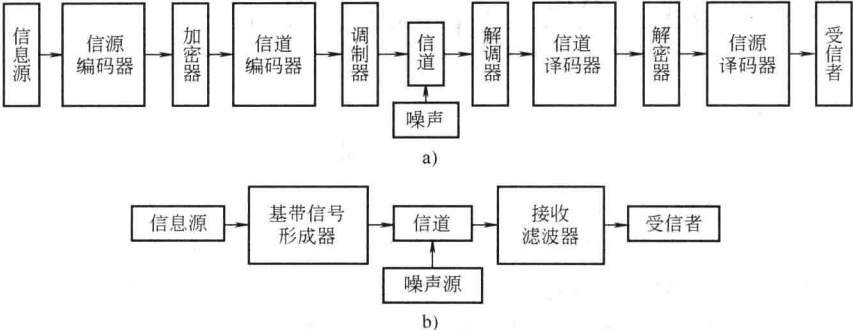


图 1-5 数字通信系统模型
a) 点对点通信系统 b) 数字基带传输系统

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，数字通信的发展速度已明显超过模拟通信，成为当代通信技术的主流。与模拟通信相比，数字通信更能适应现代社会对通信技术越来越高的要求，其优点是：

1) 抗干扰能力强。以二进制为例，信号的取值只有两个，这样接收端只需判别两种状态。信号在传输过程中受到噪声的干扰，必然会发生波形畸变，接收端对其进行抽样判决，以辨别是两个状态中的哪一个。只要噪声的大小不足以影响判决的正确性，就能正确接收。而模拟通信系统中传输的是连续变化的模拟信号，它要求接收机能够高度保真地重现信号波形，如果模拟信号叠加上噪声后，即使噪声很小，也很难消除它。而数字通信在远距离传输时，如微波中继通信，各中继站可利用数字通信特有的判决再生接收方式，对数字信号波形进行整形再生而消除噪声积累。

- 2) 差错可控。可以采用信道编码技术使误码率降低，提高传输的可靠性。
- 3) 易于与各种数字终端接口，用现代计算机技术对信号进行处理、加工、变换、存储，从而形成智能网。
- 4) 易于集成化，从而使通信设备微型化。
- 5) 易于加密处理，且保密性强。

一般来说，数字通信的许多优点都是用比模拟通信占用更宽的系统频带而换得的。以电话为例，一路模拟电话通常只占用4kHz带宽，而一路传输质量相同的数字电话则可能占用20~60kHz的带宽。在系统频带紧张场合，数字通信的这一缺点显得很突出，但是在系统频带富裕场合，比如毫米波通信、光通信等场合，数字通信几乎成了唯一的选择。考虑到现有大量模拟通信系统这一事实，目前还常常需要利用它来传输数字信号。这就需要对其做些改造，或者加装数字终端设备。如计算机数据可以通过模拟电话线路传输，但这时必须使

用调制解调器 (Modem) 将数字基带信号进行正弦调制, 以适应模拟信道的传输特性。拨号上网就是典型的数字信号通过模拟电话线路传输的例子。不过, 随着新的宽带传输信道 (如光导纤维) 的采用、微电子技术和计算机技术的迅猛发展和广泛应用, 数字通信在今后的通信方式中必将逐步取代模拟通信而占主导地位。

1.2 通信系统的分类与通信方式

上一节, 我们介绍了“通信原理”这门课所研究的对象——通信系统的组成, 本节将按照另外几种不同的分类方法, 介绍常见的通信系统和通信方式, 以便读者对“通信原理”这门课所研究的对象有一个比较深入的了解。为后续章节的学习奠定基础。

1.2.1 通信系统的分类

根据不同的目的, 通信系统有不同的分类方法。

1. 按通信业务分类

对于电信系统的客户而言, 可能会直观地将通信系统按通信业务进行分类。根据通信业务不同, 通信系统可分为话务 (电话业务) 通信和非话务通信。电话业务在电信领域中一直占主导地位, 它属于人与人之间的通信。近年来, 非话务通信发展迅速, 非话务通信主要是分组数据业务、计算机通信、数据库检索、电子邮件、电子数据交换、传真存储转发、可视图文及会议电视、图像通信等。由于电话通信最为发达, 因而其他通信常常借助于公共的电话通信系统进行。未来的综合业务数字通信网中, 各种用途的信息都能在一个统一的通信网中传输。

2. 按调制方式分类

对于研究调制解调器的通信工作者, 也许根据通信系统是否采用了调制, 以及采用了何种调制方式来对通信系统进行分类更方便。根据是否采用调制, 可将通信系统分为基带传输和频带 (调制) 传输。基带传输是将未经调制的信号直接传送, 如音频市内电话。频带传输是对各种信号调制后传输的总称。调制方式很多, 表 1-1 列出了一些常见的调制方式。

表 1-1 常见的调制方式

调制方式		用途	
连续波调制	线性调制	常规双边带调制 AM	广播
		抑制载波双边带调制 DSB-SC	立体声广播
		单边带调制 SSB	载波通信、无线电台、数传
		残留边带调制 VSB	电视广播、数传、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、QPSK 等		数据传输、数字微波、空间通信	
其他高效数字调制 QAM、MSK 等		数字微波、空间通信	

(续)

调制方式		用途	
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 PDM(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	市话、卫星、空间通信
		增量调制 ΔM	民用、军用电话
		差分脉码调制 DPCM	电视电话、图像编码
		其他语言编码方式 ADPCM、APC、LPC	中低速数字电话

3. 按信号特征分类

为了研究的方便,按照信道中所传输的是模拟信号还是数字信号,相应地把通信系统分成模拟通信系统和数字通信系统。这两种通信系统中采用的技术有许多差别。

4. 按传输媒质分类

由于不同的传输媒质对信号的影响不同,需要采用不同的技术来保证通信系统的通信质量,因此,将通信系统按传输媒质进行划分。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。有线通信是用导线(如架空明线、同轴电缆、光导纤维、波导等)作为传输媒质完成通信的,如市内电话、有线电视、海底电缆通信等。无线通信依靠电磁波在空间传播达到传递消息的目的,如短波电离层传播、微波视距传播、卫星中继等。

5. 按工作波段分类

由于不同频率的电磁波具有不同的传输特点,为了便于充分利用和管理通信资源,可按通信设备的工作频率不同分为长波通信、中波通信、短波通信、微波通信、远红外线通信等。表 1-2 列出了通信使用的频段、常用的传输媒质及主要用途。

表 1-2 通信波段与常用传输媒质

频率范围	波长	符号	传输媒质	用途
3Hz ~ 30kHz	$10^4 \sim 10^8$ m	甚低频 VLF	有线 长波无线电	音频、电话、数据终端长 距离导航、时标
30 ~ 300kHz	$10^3 \sim 10^4$ m	低频 LF	有线 长波无线电	导航、信标、电力线通信
300kHz ~ 3MHz	$10^2 \sim 10^3$ 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 ~ 30MHz	$10 \sim 10^2$ 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 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	10 ~ 100cm	特高频 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
$10^7 \sim 10^8$ GHz	$3 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$ cm	紫外、可见光 红外	光纤 激光空间传播	光通信