



高等院校
通信与信息专业规划教材

通信原理

沈越泓 高媛媛 魏以民 编著

43

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



高等院校通信与信息专业规划教材

通信原理

沈越泓 高媛媛 魏以民 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,即通过每章的开始和小结,总结性地说明本章的学习方法、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10章介绍了通信系统的数字化方法,这是当前通信理论与技术的重要发展方向。

全书共分10章,内容包括:随机过程与数理统计、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、模拟信号的数字传输、差错控制编码、同步原理和通信系统的数字化方法等。

本书可以作为通信与信息系统专业本科生的教科书,也可作为通信工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

通信原理/沈越泓等编著. —北京:机械工业出版社,2003.10
高等院校通信与信息专业规划教材
ISBN 7-111-13207-6

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(2003)第095100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:赵慧 版式设计:张世琴 责任校对:张媛
责任印制:路琳
北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2004年1月第1版·第1次印刷
787mm×1092mm^{1/16}·23.25印张·574千字
0 001—5 000册
定价:32.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、88379646
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			
编委会副主任	张文军	张思东	杨海平	徐澄圻
编委会委员	王金龙	冯正和	刘增基	李少洪
	邹家禄	吴镇扬	赵尔沅	南利平
	徐惠民	彭启琮	解月珍	
秘书长	胡毓坚			
副秘书长	许晔峰			

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地发展，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要迅速得多，这给高等院校通信专业的教学带来了很大的冲击和推动，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。

本科通信与信息系统学科的“通信原理”这门专业基础课的教材内容、教学方法如何改革，已是通信领域教育工作者必须面对的课题。我们通过十多年“通信原理”课程的教学（包括本科、硕士和博士研究生层次），认为对“通信原理”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；硕士生层次的教学定位是：回答“为什么”的问题；对博士生的教学定位是：要在了解前人解决的问题的基础上，提出新问题和解决新问题的方法，是培养学生创新能力的问题。然而，在这三个层次上，“通信原理”课程的教学又具有其共性，即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，在这个过程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与通信技术已融为一体，计算机不但早已成为通信系统的设计工具，同时计算机也已成为通信系统的重要组成部分。基于这一背景，我们萌生了编写新的本科《通信原理》教材的想法。所谓新，主要力求突出如下几点：

1. 体系新。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。我们认为可以在阐述传统通信理论和方法的基础上，将计算机作为设计通信系统和模块的“实验室”，所以在教材中有意识地加入了计算机仿真实验性习题。使学生通过本教材的学习，不但经过了传统理论学习的训练，还能自己动手完成通信系统的模块级、系统级的仿真性实验，加深对理论的理解，达到增强设计现代通信系统能力的目的。

2. 内容精。紧紧围绕本科“通信原理”教学大纲的要求，本着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”问题的原则，同时在教学上主要是教会学生学习方法的思想指导下，我们精心选择了教材的内容，力争做到在有限的教学时数内，学生通过学习本课程，真正在模块级、系统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. 可读性强。为便于读者自学，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，我们在本教材每一章的开头，都有一个简短的“序”，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，从实际应用的角度总结性地对本章内容给予了概括，并对读者进一步学习本章的内容给出建议。通过这些措施增强了教材的可读性。

本教材的参考学时是 80 学时，全书共分 10 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。第 2 章随机过程与数理统计。介绍了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做了铺垫。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，并利用数理统计的方法分析了各种调制方式的性能。第5章数字基带信号传输。这是一种最基本的数字传输系统，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。阐述了数字频带传输原理（包括调制、解调、最佳接收）。第7章模拟信号的数字传输。为了用数字通信系统来传输模拟信号，首先要将模拟信号转换成数字信号。本章通过介绍抽样定理、PCM（脉冲编码调制）、 ΔM （增量调制）等原理，讲述了模拟信号的数字方法。第8章差错控制编码。是一种以降低通信有效性为代价换取通信可靠性的方法。第9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10章通信系统的数字化方法。它是当前通信理论与技术的重要发展方向。最后还附有Q函数的计算、MATLAB软件包的说明和部分习题参考答案。

关于与本书配套的MATLAB程序和电子教案的说明如下：

1. 读者可以从机械工业出版社的网站下载相关MATLAB程序和PDF格式的电子教案文件，网址为 <http://www.cmpbook.com>。

2. 为配合本书教学，对于有一定购书数量的单位和读者，机械工业出版社将免费提供配套的ppt或pps格式的电子教案。联系方式如下：

联系人：苗小玉

联系电话：(010) 88379739

本书由沈越泓编写第1~3章、第10章的第3、4节和附录，高媛媛编写第4~6章和第10章的第2节，魏以民编写第7~9章和第10章的第1节。全书由沈越泓统稿。

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以及学院教保科许晔峰、乐超的支持，解放军理工大学理学院的杨英副教授对书稿内容提出了许多建设性意见，书稿中图的制作、习题和部分文字录入得到研究生杨保峰、谢俊韬、郭明喜、胡光兵和博士研究生简伟等的帮助，在此一并表示最诚挚的感谢！

由于时间仓促，书中难免存在不妥之处，请读者原谅，并提出宝贵意见。

编者

目 录

出版说明

前言

第 1 章 绪论	1	2.10 习题	42
1.1 通信系统的组成	1	2.11 仿真实验题	44
1.1.1 通信系统的一般模型	2	第 3 章 信道	50
1.1.2 模拟通信系统模型和数字通信 系统模型	2	3.1 恒参信道	50
1.2 通信系统分类与通信方式	5	3.1.1 有线信道	50
1.2.1 通信系统的分类	5	3.1.2 微波中继信道	51
1.2.2 通信方式	7	3.1.3 卫星中继信道	52
1.3 信息及其度量	8	3.2 随参信道	52
1.4 主要性能指标	10	3.2.1 陆地移动信道	52
1.5 通信发展简史	13	3.2.2 短波电离层反射信道	54
1.6 小结	15	3.3 信道特性及其数学模型	55
1.7 思考题	15	3.3.1 恒参信道特性及其数学模型	55
1.8 习题	16	3.3.2 随参信道特性及其数学模型	58
第 2 章 随机过程与数理统计	17	3.4 信道容量的概念	62
2.1 随机过程的一般表述	17	3.5 小结	63
2.1.1 随机过程的概念	17	3.6 思考题	64
2.1.2 随机过程的数字特征	18	3.7 习题	64
2.2 平稳随机过程及其数字特征	19	3.8 仿真实验题	66
2.3 高斯噪声	23	第 4 章 模拟通信系统	67
2.3.1 高斯随机过程(正态随机过 程)	23	4.1 概述	67
2.3.2 窄带高斯噪声、白噪声、带 限白噪声	25	4.1.1 调制在通信系统中的作用	67
2.4 正弦波加窄带高斯噪声	29	4.1.2 调制的基本特征和分类	68
2.5 随机信号通过线性系统	31	4.1.3 调制系统中讨论的主要问题 和主要参数	69
2.6 周期平稳随机过程(Cyclostationary Processes)	34	4.2 幅度调制(线性调制)的原理	69
2.7 数理统计简介	35	4.2.1 调幅(AM)	70
2.7.1 信号检测准则	35	4.2.2 抑制载波双边带调制(DSB- SC)	72
2.7.2 最大似然估计	38	4.2.3 单边带调制(SSB)	72
2.7.3 Bayes 估计与最大后验概率 估计	40	4.2.4 残留边带调制(VSB)	75
2.8 小结	41	4.3 线性调制系统的抗噪声性能	77
2.9 思考题	42	4.3.1 分析模型	77
		4.3.2 线性调制相干解调的抗噪声 性能	79
		4.3.3 调幅信号包络检波的抗噪声 性能	81
		4.4 非线性调制(角度调制)的原理	84

4.4.1	角度调制的基本概念	84	6.2.3	二进制相移键控(2PSK)	170
4.4.2	窄带调频与宽带调频	85	6.3	二进制数字调制系统的抗噪声性能	173
4.4.3	调频信号的产生与解调	89	6.3.1	相干解调系统的抗噪声性能	173
4.5	调频系统的抗噪声性能	93	6.3.2	非相干解调系统的抗噪声性能	176
4.6	各种模拟调制系统的比较	97	6.3.3	其他解调方法	180
4.7	频分复用(FDM)技术	98	6.4	二进制数字调制系统的性能比较	182
4.8	小结	100	6.4.1	误码率	182
4.9	思考题	100	6.4.2	频带宽度	184
4.10	习题	101	6.4.3	对信道特性变化的敏感性	184
第5章	数字基带信号传输	105	6.4.4	设备的复杂程度	185
5.1	概述	105	6.5	多进制数字调制系统	185
5.1.1	问题的描述	105	6.5.1	多进制数字振幅调制系统	185
5.1.2	数字基带信号的码型	107	6.5.2	多进制数字频率调制系统	188
5.1.3	数字基带信号的功率谱分析	111	6.5.3	多进制数字相位调制系统	189
5.2	数字基带传输中的码间串扰和噪声	114	6.5.4	振幅相位联合键控(APK)系统	197
5.2.1	误码产生的原因	114	6.6	恒包络调制	201
5.2.2	无码间串扰的传输特性	116	6.6.1	偏移四相相移键控(OQPSK)	201
5.3	部分响应系统	121	6.6.2	$\pi/4$ 四相相对相移键控($\pi/4$ DQPSK)	203
5.3.1	第I类部分响应波形	122	6.6.3	最小频移键控(MSK)	205
5.3.2	部分响应的一般形式	124	6.6.4	高斯最小频移键控(GMSK)	207
5.4	二进制确知信号的最佳接收	127	6.7	小结	209
5.4.1	问题的描述	127	6.8	思考题	210
5.4.2	匹配滤波器与最佳接收机结构的一般形式	128	6.9	习题	210
5.4.3	最佳检测	134	6.10	仿真实验题	212
5.4.4	二元确知信号的最佳接收机结构及性能	135	第7章	模拟信号的数字传输	218
5.4.5	最佳基带传输系统	138	7.1	抽样定理	218
5.5	眼图	141	7.1.1	低通抽样定理	218
5.6	均衡技术	143	7.1.2	带通抽样定理	221
5.6.1	时域均衡原理	144	7.2	脉冲编码调制(PCM)	223
5.6.2	均衡效果的衡量	146	7.2.1	量化	224
5.6.3	均衡器的实现与调整	149	7.2.2	编码和译码	233
5.7	小结	151	7.2.3	PCM系统的抗噪声性能	240
5.8	思考题	152	7.3	自适应差分脉冲编码调制(ADPCM)	241
5.9	习题	152	7.3.1	DPCM	242
5.10	仿真实验题	157	7.3.2	ADPCM	243
第6章	正弦载波数字调制	165	7.4	增量调制(ΔM)	243
6.1	概述	165	7.4.1	简单增量调制	244
6.2	二进制数字调制原理	166			
6.2.1	二进制振幅键控(2ASK)	166			
6.2.2	二进制频移键控(2FSK)	168			

7.4.2 增量调制的过载特性与动态 编码范围	246	9.1.3 载波相位误差对解调性能的 影响	306
7.4.3 增量调制系统的抗噪声性能	248	9.2 位同步(符号同步)	307
7.4.4 PCM与 ΔM 系统的比较	249	9.2.1 位同步的方法	307
7.5 时分复用和多路数字电话系统	250	9.2.2 位同步系统的性能及其相位 误差对性能的影响	312
7.5.1 时分多路数字电话通信系统 的组成	252	9.3 群同步(帧同步)	315
7.5.2 数字电话系统帧结构和传码 率	253	9.3.1 群同步的方法	315
7.5.3 数字通信系统高次群	254	9.3.2 群同步系统的性能	320
7.6 小结	255	9.4 小结	321
7.7 思考题	256	9.5 思考题	322
7.8 习题	257	9.6 习题	322
7.9 仿真实验题	258	第10章 通信系统的数字化方法	324
第8章 差错控制编码	265	10.1 BPSK载波相位同步系统的数 字化	324
8.1 基本概念	265	10.1.1 为什么需要载波同步	324
8.2 纠错编码的基本原理	267	10.1.2 载波相位同步的提取办法	326
8.3 常用的简单编码	270	10.2 差分编码和差分相移键控系统 的数字化	329
8.4 线性分组码	272	10.2.1 差分编码	329
8.5 循环码	277	10.2.2 差分编码BPSK(DEBPSK)	332
8.5.1 循环码原理	277	10.2.3 差分相移键控(DPSK)	334
8.5.2 循环码的编、解码方法	280	10.3 MPSK的载波相位恢复的数字化	336
8.5.3 缩短循环码	284	10.3.1 QPSK的载波相位恢复	336
8.5.4 交织技术	284	10.3.2 8PSK载波相位恢复	337
8.6 卷积码	285	10.3.3 MPSK载波相位恢复	338
8.6.1 基本概念	285	10.4 各种改进型QPSK调制解调器 的数字化	339
8.6.2 卷积码的描述	285	10.4.1 偏移正交相移键控OQPSK	339
8.6.3 卷积码的译码	286	10.4.2 差分正交相移键控DQPSK	341
8.7 网格编码调制(TCM)	287	10.5 小结	344
8.8 伪随机序列	289	10.6 仿真实验题	345
8.8.1 m 序列的产生	289	附录	351
8.8.2 m 序列的性质	291	附录A Q函数及其近似计算	351
8.8.3 m 序列的应用	293	附录B 仿真实验中M文件的说明	352
8.9 小结	295	B.1 仿真环境	352
8.10 思考题	296	B.2 M文件说明	352
8.10 习题	296	附录C 部分习题参考答案	355
第9章 同步原理	298	参考文献	360
9.1 载波同步	298		
9.1.1 载波同步的方法	298		
9.1.2 载波同步系统的性能	304		

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的定量关系有困难时，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，本章首先介绍了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？通信就是信息传输或消息传输。从古到今，人类的社会活动总离不开消息的传递和交换，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，这些都是消息传递的方式或信息交流的手段。人们可以用语言、文字、数据或图像等不同的形式来表达信息。但是这些语言、文字、数据或图像本身不是信息而是消息，信息是消息中所包含的人们原来不知而待知的内容。因此，通信的根本目的在于传输含有信息的消息，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”或“消息传输”。

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”来传递消息的电通信方式。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。

⊙ 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。

1.1.1 通信系统的一般模型

通信是从一地向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。

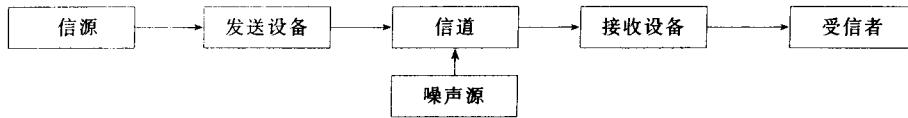


图 1-1 通信系统的一般模型

信源是消息的产生地，其作用是把各种消息转换成原始电信号，原始电信号称为消息信号或基带信号。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，即将信源产生的消息信号转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（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信号转换成相应的消息。

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，信源发出的消息可以分为两类：一类称为连续消息；另一类称为离散消息。连续消息是指消息的状态连续变化或是不可数的，如语音、活动图片等。连续消息也称模拟消息。离散消息则是指消息的状态是可数的或离散的，如符号、数据等。离散消息也称数字消息。

为了传递消息，各种消息都需要转换成电信号。由图 1-1 的通信过程可知，消息与电信号之间必须建立单一的对应关系，否则在接收端就无法恢复出原来的消息。通常把消息寄托在电信号的某一参量上。按信号参量的取值方式不同可把信号分为两类，即模拟信号和数字信号。

如果电信号的参量携带着模拟消息，则该参量必将是连续取值的，称这样的信号为模拟信号。例如，普通电话机输出的信号就是模拟信号。模拟信号有时也称连续信号，这个连续是指信号的某一参量可以连续变化，或者说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 1-2b 所示的抽样信号。

如果电信号的参量携带着数字消息，则该参量必是离散取值的。这样的信号就称为数字信号。例如，电传机输出的信号就是数字信号。数字信号有时也称离散信号，这个离散是指

信号的某一参量是离散变化的，而不一定在时间上也离散，如图 1-3b 所示的 2PSK 信号。

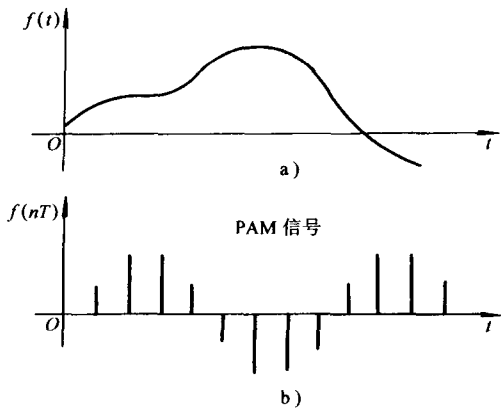


图 1-2 模拟信号波形
a) 连续信号 b) 抽样信号

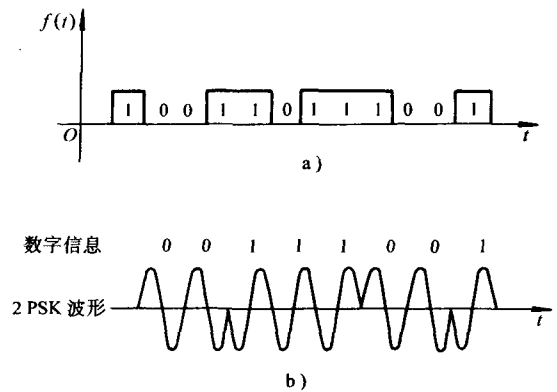


图 1-3 数字信号波形
a) 二进制波形 b) 2PSK 波形

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。

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。系统中需要两种变换。首先，发送端的连续消息要变换成原始电信号，接收端收到的信号要反变换成原来的连续消息。由于原始电信号通常具有很低的频谱分量，一般不宜直接传输，因此常常需要有第二种变换：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 0~6 MHz。

需要指出，消息从发送端到接收端的传递过程中，不仅仅只有上述两种变换，实际通信系统中可能还有滤波、放大、天线辐射、控制等过程。本书只着重研究上述两种变换与反变换，其余过程被认为都是足够理想的，而不予讨论。

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。

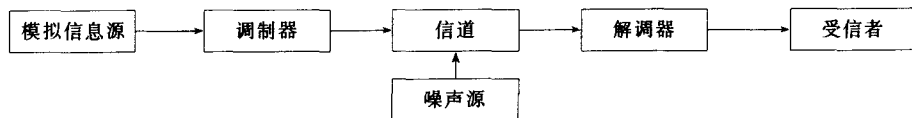


图 1-4 模拟通信系统模型

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消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消息，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。

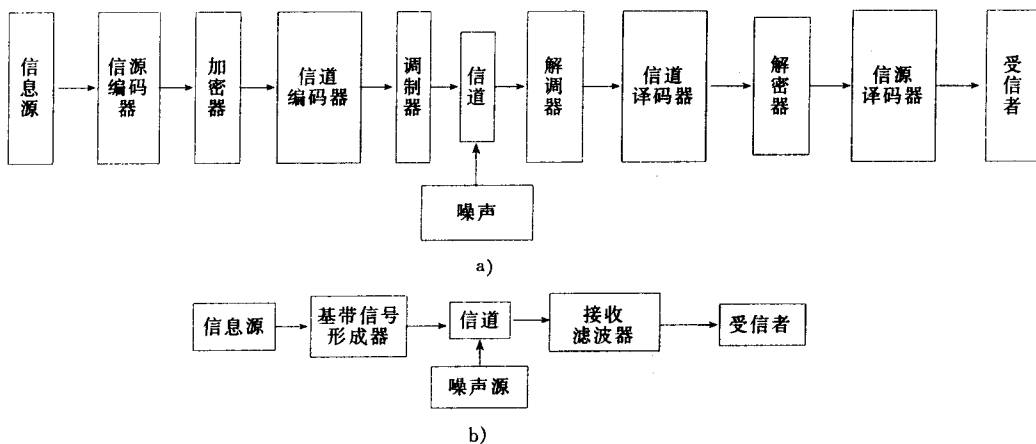


图 1-5 数字通信系统模型

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，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。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。在系统频带紧张の場合，数字通信的这一缺点显得很突出，但是在系统频带富裕の場合，比如毫米波通信、光通信等場合，数字通信几乎成了惟一的选择。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消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	常规双边带调幅 AM	广播
		抑制载波双边带调幅 DSB	立体声广播
		单边带调幅 SSB	载波通信、无线电台、数传
		残留边带调幅 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	幅度键控 ASK	数据传输
		频率键控 PSK	数据传输
		相位键控 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
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 DM	民用、军用电话
		差分脉码调制 DPCM	电视电话、图像编码
		其他语音编码方式 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。无线通信是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。

工作波长和频率的换算公式为

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

式中, λ 为工作波长 (m), f 为工作频率 (Hz), c 为光速 (m/s)。

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	$10^3 \sim 10^4$ m	低频 LF	有线线对 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

6. 按信号复用方式分类

传输多路信号有三种复用方式, 即频分复用、时分复用和码分复用。频分复用是用频谱搬移的方法使不同信号占据不同的频率范围; 时分复用是用脉冲调制的方法使不同信号占据不同的时间区间; 码分复用是用正交的脉冲序列分别携带不同信号。传统的模拟通信中都采用频分复用, 随着数字通信的发展, 时分复用通信系统的应用愈来愈广泛, 码分复用主要用于移动通信和空间通信的扩频通信中。

1.2.2 通信方式

前述通信系统是单向通信系统, 但在多数场合下, 信源兼为信宿, 需要双向通信。电话就是一个最好的例子, 这时通信双方都需要有发送和接收设备, 并需要各自的传输媒质, 如果通信双方共用一个信道, 就必须用频率或时间分割的方法来共享信道。因此, 通信过程中涉及通信方式与信道共享问题。下面只对通信方式作一简单介绍。

1. 按消息传递的方向与时间关系分

对于点对点之间的通信, 按消息传递的方向与时间关系, 通信方式可分为单工、半双工及全双工通信三种。

单工通信, 是指消息只能单方向传输的工作方式, 因此只占用一个信道, 如图 1-6a 所