



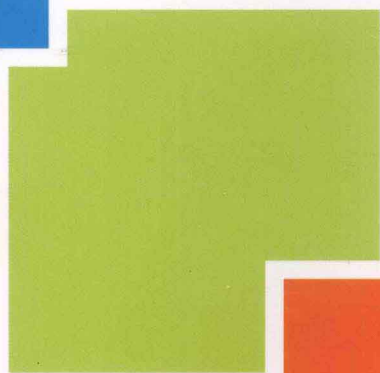
工业和信息化普通高等教育  
“十二五”规划教材立项项目

孙爱晶 党薇 吉利萍 编著

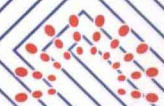
# 通信原理

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

Principles of Communications



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



高校系列



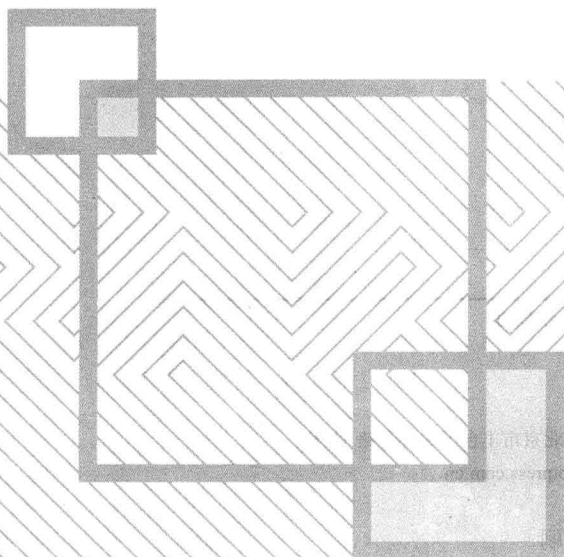
工业和信息化普通高等教育  
“十二五”规划教材立项项目

孙爱晶 党薇 吉利萍 编著

# 通信原理

高等院校信息与通信工程规划教材  
University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

## Principles of Communications



人民邮电出版社  
北京



高校系列

## 图书在版编目 (C I P) 数据

通信原理 / 孙爱晶, 党薇, 吉利萍编著. — 北京 :  
人民邮电出版社, 2013. 12  
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材  
ISBN 978-7-115-33276-9

I. ①通… II. ①孙… ②党… ③吉… 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(2013)第282691号

## 内 容 提 要

本书以现代通信系统为背景,全面、系统地介绍了现代通信原理知识。全书共有8章,内容包括通信系统基本概念、信号分析、信道与噪声、模拟调制系统、数字基带传输系统、数字信号的频带传输系统、脉冲编码调制系统和差错控制编码。

本书内容系统性强、深浅得当,突出基本概念和基本原理的阐述,诠释准确,注重知识的归纳和总结,并附有适量的思考题和习题。本书语言通俗易懂,叙述深入浅出、层次分明。

本书适用面宽,可作为高等院校通信工程、电子信息工程、物联网工程、电子信息科学与技术、计算机科学与技术等专业的必修课或选修课教材,同时也可作为相关领域工程技术人员的技术参考书。



- 
- ◆ 编 著 孙爱晶 党 薇 吉利萍  
责任编辑 李海涛  
责任印制 彭志环 杨林杰
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京中新伟业印刷有限公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 19.25 2013年12月第1版  
字数: 495千字 2013年12月北京第1次印刷
- 

定价: 45.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316  
反盗版热线: (010)81055315

通信产业是我们国民经济的支柱产业之一。围绕“两化融合”、“三网融合”、“建设宽带、融合、安全、泛在的下一代国家信息基础设施”等一系列的战略目标，涌现出了越来越多的相关学科、专业和技术与通信领域的交叉和融合。“通信原理”课程作为学习通信系统基础理论的必修课程，不仅仅是通信类专业的核心专业基础课，也是许多其他专业的选修课程。这门课程对“高等数学”、“数理统计”、“概率论”、“模拟电路与数字电路”、“信号与系统”等基础课程的掌握程度要求较高，而且涉及的内容广泛。如何在有限的学时达到更好的讲授和学习效果，一直以来都是一线的教师在探索的问题。

本教材根据我们 20 多年讲授通信原理课程的经验与实践，以“重点突出、分析透彻、注重应用”为原则，针对电子信息类及其他相关专业的培养要求，对教材内容进行了认真梳理、选择和编排，期望使读者能通过本教材对通信系统的本质和主要技术原理有一个系统而准确的认知。

通信原理侧重讲述信号的传输。本书以通信系统的基本模型为线索，系统分析了信号传输的完整过程，详细阐述了信号传输过程中的关键技术，强调关键环节信号的数学表达和推导，旨在使读者在有限的学时内把握通信原理的精髓。同时，书中特别注意理论联系实际，在阐述基本原理的基础上，例举了许多应用实例。为了帮助读者掌握基本分析方法，书中列举了许多例题，各章末尾还附有大量的思考题与习题。

全书共分为 8 章，参考学时为 64 学时。

第 1 章是绪论，在介绍通信系统基本模型的基础上，讲述了通信系统的组成和分类、信息及其度量的基础知识、数字通信系统的优点及其主要性能指标。

第 2 章是信号分析，对确知信号和随机信号进行了简要论述。信号分析是全书及整个通信系统的理论分析重要基础和数学工具，由于先行课对确知信号进行过具体分析，本章重点介绍了随机过程的概念，分析了通信系统中常见的几种随机过程。

第 3 章是信道与噪声，介绍了信道的基本概念和特性，以及通信中可能存在的各种噪声，论述了不同信道对所传输信号的影响，最后提出了信道容量的概念。

第 4 章是模拟调制系统，从时域、频域的角度阐述了各种模拟调制的原理和调制解调方法，详细地论述了抗噪声性能的基本分析方法和线性调制的一般模型，并介绍了频分复用的基本概念及应用。

第 5 章是数字基带传输系统，介绍了基带传输信号的基本码型及其各自的特点，阐述了几种常用传输码型的编/译码规则，分析了码间串扰产生的原因，论述了系统无码间串扰的传

输特性以及眼图的概念。

第6章是数字频带传输系统，主要介绍数字调制解调技术，重点介绍了二进制的ASK、FSK及PSK(DPSK)的原理，分析了各种调制解调系统的性能，最后介绍了四进制的调制解调原理。

第7章是脉冲编码调制系统，主要以模拟信号数字化过程为线索，阐述了对信号的抽样、量化和编码，重点介绍了A律13折线的编解码原理，在此基础上介绍了DPCM和 $\Delta M$ 的基本原理，分析了时分复用的基本原理，介绍了PCM30/32系统的基群帧结构。

第8章是差错控制编码，讲述了差错控制编码的机理及常用检错码和纠错码的概念，重点分析了汉明码和循环码的构成原理及解码方法。

本书的特点是系统性强、内容编排紧凑、突出基本概念和原理，并对关键概念保留了数学推导和计算，便于深入地理解通信基本理论。本书语言简练、通俗易懂、深入浅出，适用对象广泛，可作为高等学校通信工程、电子信息工程、物联网工程、电子信息科学与技术、计算机科学与技术等专业的必修课或选修课教材，同时也可作为相关领域工程技术人员的技术参考书。本书出版后还将出版通信原理的实验开发教材，可进一步配合实践教学。

本书由孙爱晶任主编并编写第3章、第4章、第7章，吉利萍编写第1章、第6章，党薇编写第2章、第5章，第8章由吉利萍和党薇共同编写。孙爱晶负责全书统稿。与作者多年共同从事本课程教学的刘毓教授对本书的出版给予了很大的支持，在此深表感谢。感谢李宗、焦淑云、黄源、顾小东、冯勋、马士雄和彭飞为本书的出版做出的贡献。同时，对书中所引用参考文献的作者表示崇高的敬意和真诚的感谢！

限于编者水平，书中错误与不足在所难免，恳请读者指正。

作者联系方式为：[sun\\_aijing@qq.com](mailto:sun_aijing@qq.com)。

编 者

2013年7月于西安

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1	2.4.2 无失真传输系统 .....	32
1.1 通信的基本概念 .....	1	2.4.3 系统带宽 .....	33
1.2 通信系统的组成模型 .....	1	2.4.4 理想低通和理想 带通滤波器 .....	33
1.2.1 通信系统的一般模型 .....	2	2.5 随机过程的概念和统计描述 .....	34
1.2.2 模拟通信系统模型 .....	3	2.5.1 随机过程的概念 .....	34
1.2.3 数字通信系统模型 .....	4	2.5.2 随机过程的概率分布 .....	35
1.2.4 数字通信的主要优缺点 .....	6	2.5.3 随机过程的数字特征 .....	36
1.3 通信系统的分类及通信方式 .....	7	2.6 平稳随机过程 .....	38
1.3.1 通信系统的分类 .....	7	2.6.1 平稳随机过程 .....	38
1.3.2 通信方式 .....	9	2.6.2 广义平稳随机过程 .....	38
1.4 通信的发展概况 .....	11	2.6.3 各态历经性 .....	38
1.5 信息及其度量 .....	14	2.6.4 平稳随机过程的自相关函数 .....	40
1.6 通信系统主要性能指标 .....	17	2.6.5 平稳随机过程的功率谱密度 .....	40
1.6.1 模拟通信系统的性能指标 .....	17	2.6.6 平稳随机过程通过线性系统 .....	42
1.6.2 数字通信系统的性能指标 .....	18	2.7 高斯随机过程 .....	43
小结 .....	19	2.7.1 高斯随机过程的定义 .....	43
思考题与习题 .....	20	2.7.2 高斯随机过程的性质 .....	44
第 2 章 信号分析 .....	22	2.7.3 高斯随机过程的 一维统计特性 .....	44
2.1 信号的分类 .....	22	2.8 窄带随机过程 .....	46
2.1.1 确知信号和随机信号 .....	22	2.8.1 定义 .....	46
2.1.2 周期信号和非周期信号 .....	22	2.8.2 窄带随机过程的表示 .....	46
2.1.3 能量信号和功率信号 .....	23	2.8.3 $\xi_c(t)$ 和 $\xi_s(t)$ 的统计特性 .....	47
2.2 确知信号的频域分析 .....	23	2.8.4 $a_\xi(t)$ 和 $\varphi_\xi(t)$ 的统计特性 .....	48
2.2.1 傅里叶变换 .....	23	2.9 正弦波加窄带高斯噪声 .....	50
2.2.2 傅里叶变换的性质 .....	24	2.9.1 正弦波加窄带高斯 噪声的表示 .....	50
2.2.3 典型信号的傅里叶变换 .....	25	2.9.2 统计特性 .....	50
2.2.4 能量谱密度及功率谱密度 .....	28	2.10 白噪声和带限白噪声 .....	52
2.3 确知信号的时域分析 .....	29	2.10.1 白噪声 .....	52
2.3.1 相关函数的定义 .....	30	2.10.2 低通白噪声 .....	53
2.3.2 相关函数的性质 .....	30	2.10.3 带通白噪声 .....	54
2.3.3 相关函数与谱密度 之间的关系 .....	31	2.10.4 窄带高斯白噪声 .....	55
2.4 确知信号通过线性系统 .....	32		
2.4.1 信号通过线性系统 .....	32		

小结 .....	55	4.4.1 角度调制的基本概念 .....	112
思考题与习题 .....	56	4.4.2 窄带角调制 .....	115
<b>第3章 信道与噪声</b> .....	<b>58</b>	4.4.3 宽带角调制 .....	117
3.1 狭义信道 .....	58	4.4.4 调频信号的产生与解调 .....	123
3.1.1 有线信道 .....	58	4.5 调频系统的抗噪声性能 .....	126
3.1.2 无线信道 .....	61	4.5.1 非相干解调的抗噪声性能 .....	126
3.2 广义信道 .....	64	4.5.2 相干解调的抗噪声性能 .....	132
3.2.1 调制信道 .....	64	4.6 模拟调制系统的性能比较 .....	133
3.2.2 编码信道 .....	65	4.7 频分多路复用及模拟调制系统	
3.3 恒参信道及其对信号传输的影响 .....	67	应用举例 .....	135
3.3.1 无失真传输条件 .....	67	4.7.1 频分多路复用 .....	135
3.3.2 幅频失真 .....	68	4.7.2 载波电话系统 .....	136
3.3.3 相频失真(群时延失真) .....	69	4.7.3 调频立体声广播 .....	136
3.4 随参信道及其对信号传输的影响 .....	70	小结 .....	138
3.4.1 多径衰落和频率弥散 .....	71	思考题与习题 .....	139
3.4.2 频率选择性衰落 .....	72	<b>第5章 数字基带传输系统</b> .....	<b>142</b>
3.4.3 随参信道特性的改善 .....	74	5.1 数字基带信号 .....	142
3.5 信道噪声 .....	75	5.1.1 数字基带信号的码型	
3.6 信道容量 .....	76	设计原则 .....	142
3.6.1 连续信道容量 .....	76	5.1.2 数字基带信号的波形 .....	143
3.6.2 离散信道容量 .....	78	5.1.3 基带传输的常用码型 .....	145
小结 .....	80	5.2 数字基带信号的功率谱 .....	148
思考题与习题 .....	81	5.3 数字基带信号传输与码间串扰 .....	154
<b>第4章 模拟调制系统</b> .....	<b>83</b>	5.3.1 数字基带传输系统的组成 .....	154
4.1 调制的基本概念 .....	83	5.3.2 基带系统传输特性及	
4.2 幅度调制(线性调制)的原理 .....	84	码间串扰 .....	156
4.2.1 常规双边带调幅(AM) .....	84	5.4 无码间串扰系统的时域特性 .....	157
4.2.2 抑制载波双边带调幅		5.4.1 消除码间串扰的基本思想 .....	157
(DSB-SC) .....	88	5.4.2 无码间串扰的时域条件 .....	158
4.2.3 单边带调制(SSB) .....	90	5.4.3 理想基带传输系统 .....	158
4.2.4 残留边带调制(VSB) .....	98	5.5 无码间串扰的频域特性 .....	160
4.2.5 线性调制的一般模型 .....	100	5.5.1 无码间串扰的频域特性 .....	160
4.3 线性调制系统的抗噪声性能 .....	103	5.5.2 无码间串扰的滚降	
4.3.1 DSB调制系统的性能 .....	105	系统特性 .....	162
4.3.2 SSB调制系统的性能 .....	106	5.6 基带系统的抗噪声性能 .....	165
4.3.3 AM包络检波的性能 .....	108	5.6.1 二进制双极性基带系统 .....	166
4.4 角度调制(非线性调制)		5.6.2 二进制单极性基带系统 .....	167
的原理 .....	112	5.7 眼图 .....	168
		小结 .....	170

思考题与习题 .....	170	第7章 脉冲编码调制系统 .....	227
第6章 数字频带传输系统 .....	173	7.1 引言 .....	227
6.1 二进制振幅键控 .....	173	7.2 抽样 .....	228
6.1.1 2ASK 信号的产生 .....	173	7.2.1 低通模拟信号的抽样定理 .....	228
6.1.2 2ASK 信号的功率谱密度 .....	174	7.2.2 带通模拟信号的抽样定理 .....	230
6.1.3 2ASK 信号的解调 .....	176	7.2.3 实际抽样 .....	232
6.1.4 2ASK 系统的抗噪声性能 .....	177	7.2.4 脉冲振幅调制 (PAM) .....	234
6.2 二进制频移键控 .....	184	7.3 量化 .....	235
6.2.1 2FSK 信号的产生 .....	184	7.3.1 量化原理 .....	235
6.2.2 2FSK 信号的功率谱密度 .....	185	7.3.2 均匀量化 .....	236
6.2.3 2FSK 信号的解调 .....	186	7.3.3 非均匀量化 .....	238
6.2.4 2FSK 系统的抗噪声性能 .....	188	7.4 PCM 系统的编码和解码 .....	247
6.3 二进制相移键控 .....	192	7.4.1 自然二进制码和	
6.3.1 2PSK 信号的产生 .....	192	折叠二进制码 .....	247
6.3.2 2PSK 信号的功率谱密度 .....	193	7.4.2 PCM 编解码原理 .....	248
6.3.3 2PSK 信号的解调 .....	194	7.4.3 逐次比较型编码器 .....	252
6.3.4 2PSK 系统的抗噪声性能 .....	195	7.5 差分脉冲编码调制 .....	254
6.4 二进制差分相移键控 .....	197	7.5.1 预测编码简介 .....	254
6.4.1 2DPSK 信号的产生 .....	197	7.5.2 差分脉冲编码调制	
6.4.2 2DPSK 信号的功率谱密度 .....	198	原理及性能 .....	255
6.4.3 2DPSK 信号的解调 .....	198	7.6 增量调制 .....	257
6.4.4 2DPSK 系统的		7.6.1 增量调制原理 .....	257
抗噪声性能 .....	200	7.6.2 增量调制的不过载条件和	
6.5 二进制数字调制系统的		动态范围 .....	259
性能比较 .....	204	7.6.3 增量调制系统中的	
6.6 多进制数字调制原理 .....	206	量化噪声 .....	259
6.6.1 多进制振幅键控 .....	207	7.7 时分复用和数字复接 .....	261
6.6.2 多进制频移键控 .....	208	7.7.1 基本概念 .....	261
6.6.3 多进制相移键控 .....	209	7.7.2 准同步数字体系 .....	262
6.6.4 多进制差分相移键控 .....	212	7.7.3 同步数字体系 .....	264
6.7 多进制数字调制系统的		小结 .....	265
抗噪声性能 .....	217	思考题与习题 .....	266
6.7.1 MASK 系统的抗噪声性能 .....	217	第8章 差错控制编码 .....	268
6.7.2 MFSK 系统的抗噪声性能 .....	219	8.1 差错控制编码的基本概念 .....	268
6.7.3 MPSK 系统的抗噪声性能 .....	222	8.1.1 随机加性干扰信道的分类 .....	268
6.7.4 MDPSK 系统的		8.1.2 差错控制方式 .....	269
抗噪声性能 .....	223	8.1.3 差错控制编码的分类 .....	270
小结 .....	223	8.2 差错控制编码的基本原理 .....	271
思考题与习题 .....	224	8.2.1 差错控制编码的举例 .....	271



8.2.2	分组码 .....	271
8.2.3	码距与检错、纠错能力的关系 .....	272
8.3	常用的简单编码 .....	273
8.3.1	奇偶监督码 .....	273
8.3.2	二维奇偶监督码 .....	274
8.3.3	恒比码 .....	274
8.3.4	正反码 .....	274
8.4	线性分组码 .....	275
8.4.1	线性分组码的概念 .....	275
8.4.2	监督矩阵 $H$ .....	275
8.4.3	生成矩阵 $G$ .....	277
8.4.4	校正子和纠错能力 .....	278
8.4.5	线性分组码的性质	

	和汉明码 .....	279
8.5	循环码 .....	281
8.5.1	基本概念 .....	281
8.5.2	循环码的生成多项式和生成矩阵 .....	284
8.5.3	循环码的编码方法 .....	285
8.5.4	循环码的解码方法 .....	286
	小结 .....	288
	思考题与习题 .....	288
附录 A	常用数学公式 .....	291
附录 B	误差函数值表 .....	293
附录 C	部分习题参考答案 .....	296
参考文献	.....	300

随着数字通信技术与计算机技术、传感技术的快速发展以及通信网与计算机网的相互融合,信息科学技术已成为 21 世纪国际社会和世界经济发展的强大推动力。没有通信,人类社会是不可想象的。信息作为一种资源,只有通过广泛地传播与交流,才能产生利用价值,促进社会成员之间的合作,推动社会生产力的发展,创造出巨大的经济效益。

为了使读者对通信和通信系统有一个初步的了解与认识,本章将简要介绍通信系统的基本概念、通信系统的组成模型、通信系统的分类与通信方式、通信的发展概况、信息的度量以及评价通信系统性能的主要指标。

## 1.1 通信的基本概念

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、网络等,都是消息传递的方式或信息交流的手段。可见,消息(message)是人类物质或精神状态的一种反映,在不同的时期具有不同的表现形式。人们接收消息,关心的是消息中所包含的人们原来未知而待知的内容,即信息(information)。

因此,通信的根本目的在于传递消息中所包含的信息。通信从本质上是信息传递功能的一门科学技术,要将大量有用的信息无失真、高效率地进行传输,同时还要在传输过程中将无用信息和有害信息尽可能地抑制掉。

实现通信的方式和手段很多。人们可以利用旗帜、消息树、烽火台、手势等“非电”方式进行信息传输,也可以利用电报、电话、广播、电视、遥控、遥测、因特网和计算机网等“电”方式进行通信。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,因而得到了迅速的发展和广泛的应用。如今,在自然科学领域涉及“通信”这一术语时,一般是指“电通信”,包括光通信,因为光也是一种电磁波。

在电通信系统中,消息的传递是通过电信号来实现的。信号是与消息一一对应的电量,它是消息的物质载体,即消息是载荷在电信号的某一参量上的,例如可以利用信号的振幅来传递消息。

## 1.2 通信系统的组成模型

通信的目的是交换不同地点的消息。例如,将地点 A 的消息传输到地点 B,或者反过来

将地点 B 的消息传输到地点 A。待传输的消息可以是语言、文字、图像或者数据等。消息在发送端首先被变换为各种形式的电信号，然后经过各种各样的电信道（例如有线通信中的明线、电缆；无线通信中的短波、微波等）传输到接收端，接收端再把接收到的电信号还原为与发送端相同或尽可能相同的消息。

将各种通信系统和设备中消息传输的完整过程高度概括，就可以得到通信系统的一般模型。

### 1.2.1 通信系统的一般模型

实现信息传递所需的一切技术设备和传输媒质的总和称为通信系统。通信系统的一般模型如图 1.1 所示。

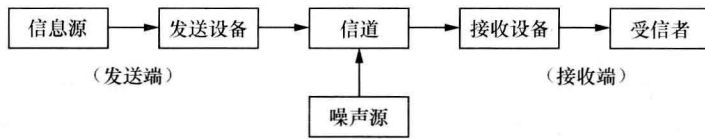


图 1.1 通信系统的一般模型

图 1.1 中各部分的功能简述如下：

#### 1. 信息源

信息源（简称信源）是消息的产生地，其作用是把各种消息转换成原始电信号。通常，这种直接由消息转换得到的电信号的频率都比较低，称之为基带信号。

根据信息源输出信号的特征不同可分为模拟信源和数字信源。模拟信源输出连续的模拟信号，如话筒（将人的声音转换为音频信号）、摄像机（将图像转换为视频信号）；数字信源则输出离散的数字信号，如电传机（将键盘字符转换为数字信号）、计算机等各种数字终端。由于信息源产生信息的种类和速率不同，因而对传输系统的要求也各不相同。

#### 2. 发送设备

发送设备是将信源产生的消息信号变换成适合在信道中传输的信号，其作用是使发送信号的特性和信道特性相匹配，使发送信号具有抗信道干扰的能力，并且具有足够大的功率以满足远距离传输的需要。因此，发送设备是一个总体概念，它涵盖的内容很多，可能包含变换、放大、滤波、调制、编码、保密等过程。对于多路传输系统，发送设备中还包括多路复用器。

#### 3. 信道

信道是传输信号的物理媒质，用来将来自发送设备的信号传送到接收端。常用的信道有架空明线、电缆、光纤等有线信道和中长波、短波、微波等无线信道。信道既给信号提供传输的通路，也会对信号产生各种干扰和噪声。信道的固有特性及引入的干扰与噪声直接关系到通信的质量。

#### 4. 噪声源

噪声主要来自于信道。发送设备和接收设备中也有一定的噪声。为了便于描述，把噪声源视为通信系统中各处噪声的集中表现而抽象加入到信道。噪声通常是随机的、形式多样的，它的出现干扰了正常信号的传输。

#### 5. 接收设备

接收设备的基本功能是完成发送设备的反变换，即进行解调、译码、解密等。它的任务

是从带有干扰的接收信号中正确恢复出相应的原始基带电信号。

## 6. 受信者

受信者是传输信息的归宿点，其作用是将恢复的原始基带电信号转换成相应的消息，如扬声器等。

图 1.1 概括地描述了一个通信系统的组成，它反映了通信系统的共性，因此称之为通信系统的一般模型。根据研究的对象以及所关注的问题不同，有不同形式的更具体的通信模型。今后的讨论就是围绕着通信系统的模型而展开的。

### 1.2.2 模拟通信系统模型

在电通信系统中，消息的传递是载荷在电信号的某一参量上的（如连续波的幅度、频率或相位；脉冲波的幅度、宽度或位置）。依据电信号参量的取值方式不同，可以把信号分为两类：模拟信号和数字信号。判断一个信号是模拟信号还是数字信号，关键在于确定携带消息的信号参量是哪个物理量，然后再根据物理量的取值状态进行判断。

(1) 模拟信号：携带消息的信号参量取值连续无限，例如图 1.2 所示为语音信号 (a) 和抽样信号 (b)。由图可见，随着时间的变化信号的幅度在变，因此可以确定携带消息的信号参量是信号的幅度。无论是语音信号还是抽样信号，幅度的取值状态都是连续无限的，不同的是，前者是时间连续信号，后者是时间离散信号。

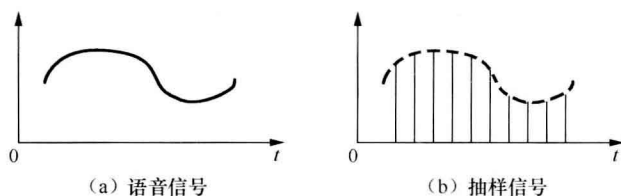


图 1.2 模拟信号

(2) 数字信号：携带消息的信号参量取值离散有限，例如图 1.3 所示为二进制信号 (a) 和 2PSK 信号 (b)。在图 (a) 中，携带消息的物理参量是矩形波的幅度，幅度的变化只有两种状态；在图 (b) 中，携带消息的物理参量是正弦波的相位，相位的变化只有  $0$  和  $\pi$  两种状态。因此，它们均属于数字信号，并且都是时间连续信号。

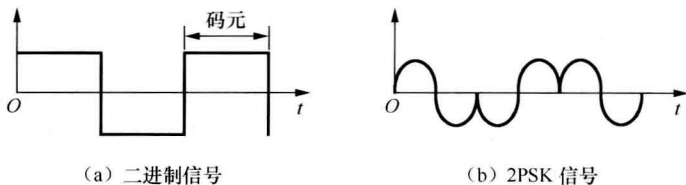


图 1.3 数字信号

通常，按照信道中传输的是模拟信号还是数字信号，相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。模拟通信系统是利用模拟信号来传递消息的通信系统，其模型如图 1.4 所示。

在模拟通信系统中，通常包含两种重要变换。第一种变换：信息源将模拟消息转换成原始电信号，并在接收端进行相反的变换，这种变换和反变换由信源和受信者来完成。这里所

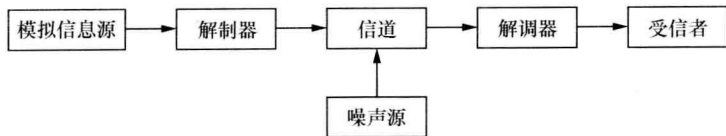


图 1.4 模拟通信系统模型

说的原始电信号通常称为基带信号，基带的含义是信号的频谱从零频附近开始，频率都比较低，如语音信号的频率范围为  $300\sim 3400\text{Hz}$ ，图像信号的频率范围为  $0\sim 6\text{MHz}$ 。有些信道可以直接传输基带信号，而以自由空间作为信道的无线电传输却无法直接传输这些基带信号。因此，模拟通信系统中常常需要进行第二种变换：把基带信号变换成适合在信道中传输的信号，并在接收端完成反变换。完成这种变换和反变换的通常是调制器和解调器。经过调制以后的信号称为已调信号，它应具有两个基本特征：一是携带有信息；二是适宜在信道中传输。由于已调信号的频谱通常具有带通形式，因而已调信号又称为带通信号或频带信号。下面以图 1.5 所示的双边带（DSB）系统为例，简单分析调制与解调的原理。

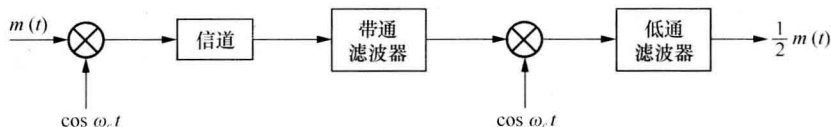


图 1.5 双边带 (DSB) 系统模型图

在图 1.5 中，通过基带信号  $m(t)$  与载波  $\cos\omega_c t$  的相乘来实现调制，产生高频已调信号  $m(t)\cdot\cos\omega_c t$ ，经信道传输后，在接收端已调信号与提取的相干载波进行相乘得到  $\frac{1}{2}m(t)(1+\cos 2\omega_c t)$ ，然后通过低通滤波器滤除二倍频成分，得到  $\frac{1}{2}m(t)$ ，实现信号的正确解调。

应该指出，在实际的模拟通信系统中除了上述的两种重要变换，可能还有滤波、放大、天线辐射等过程。由于上述两种变换起主要作用，而其他过程不会使信号发生质的变换，只是对信号进行放大和改善信号特性等，在通信系统模型中一般被认为是理想的而不予讨论。因此，本书中关于模拟通信系统的研究重点是：调制与解调原理以及噪声对信号传输的影响。

### 1.2.3 数字通信系统模型

数字通信系统（Digital Communication System, DCS）是利用数字信号来传递信息的通信系统。数字通信系统可进一步细分为数字频带传输通信系统、数字基带传输通信系统和模拟信号数字化传输通信系统。下面分别加以说明。

#### 1. 数字频带传输通信系统

通常把含有调制器/解调器的数字通信系统称为数字频带传输通信系统，其模型如图 1.6 所示。需要说明的是，图 1.6 中调制/解调、加密/解密、编码/译码等环节，在具体通信系统中是否全部采用，这要取决于具体设计条件和要求。但在一个系统中，如果发送端有调制/加密/编码，则接收端必须有解调/解密/译码。下面对各模块的作用分别进行说明。

(1) 信源编码与译码。信源编码有两个基本功能：一是提高信息传输的有效性，即在保

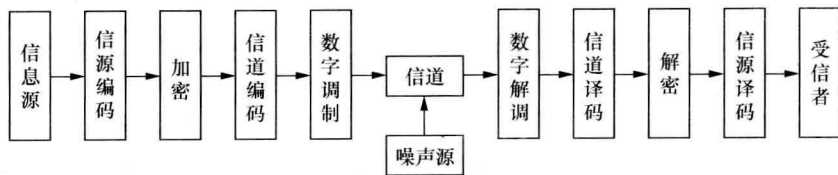


图 1.6 数字频带传输通信系统模型

证原始消息质量的前提下，通过某种数据压缩技术尽量设法减少码元数目和降低码元速率，码元速率低占用系统的频率资源就少，这对提高通信系统的传输效率有重大意义；二是完成模/数（A/D）变换，即当信息源输出的是模拟信号时，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。在数字移动通信系统中，由于频率资源有限，模拟语音信号的编码都采用了各种高效的编码技术，编码速率为 13kbit/s 或 8bit/s（普通电话网上的语音编码速率为 64kbit/s）。信源译码是信源编码的逆过程。

（2）加密与解密。在需要实现保密通信的场合，为了保证所传信息的安全，人为地将被传输的数字序列扰乱，即加上密码，这种处理过程叫加密。在接收端利用与发送端相同的密码复制品对收到的数字序列进行解密，恢复原来信息。

（3）信道编码与译码。信道编码是对原始信号的第二次编码，目的是增强数字信号的抗干扰能力，提高通信系统的可靠性。信号在传输过程中，会受到噪声和其他干扰的影响而造成错码。为了减少差错，信道编码器对传输的信息码元按照一定的规则加入一些多余码元（监督码元），它们和所要传输的信息码元有一定的关系。利用这种关系，在接收端信道译码器可以发现传输过程中产生的错码或纠正错码，从而提高通信系统的可靠性。

（4）数字调制与解调。数字调制就是把数字基带信号的频谱搬移到高频处，形成适合在信道中传输的带通信号。基本的数字调制方式有振幅键控（ASK）、频移键控（FSK）、绝对相移键控（PSK）、差分相移键控（DPSK）。在接收端可以采用相干解调或非相干解调方式还原数字基带信号。数字调制是本教材的重点内容之一，将在第 6 章中进行讨论。

（5）同步。同步是使收发两端的信号在时间上保持步调一致，是保证数字通信系统有序、准确、可靠工作的前提条件。由于本书未单设篇章讨论同步系统原理，这里拟加以概括介绍。

从功能和实现环境的方法不同，同步可分为以下 4 种方式：

① 载波同步。在数字或模拟调制系统中，为了利用相干解调方式准确恢复原信息，接收端提供的“本地载波”或“相干载波”应与接收到的已调制载波严格同频同相。这就是载波同步。

② 码元同步或位同步。典型应用诸如数字信号基带传输系统，以一定码型的脉冲编码波形序列，直接进入基带信道传输，收发两端的位定时系统，可以确保系统有一致的时钟，以便有序、准确地对失真的接收波形进行定时抽样，从而正确判决原发送信息。

③ 帧同步。数字、数据信号传输，往往要按照一定规则划分为一定规模的分组数据块（数据报），可称其为信息帧。如一个经过压缩编码的静止画面，是由多个图块构成的信息分组也为 1 帧，还可将一个画面作为 1 帧。不论帧的大小，均在发送前加有帧头与帧尾的额外开销，以便转发或接收时正确认定逐个帧的完整性和帧序。如数字电话——PCM 基群共有 32 个时隙，每时隙一个样值编 8bit 码字，共 256bit，计为 1 帧，应加入帧定位字，并且每 16 帧又构成一个复帧，又加入复帧定位字，以便逐帧地顺序接收各用户编码信息。

④ 网同步。在目前通信网发达的时代，很多通信系统是由网络功能构成的。地区网或全国网必须设有网同步，根据网络的类型或要求不同，网络同步的定时时钟可取自国际 1 级时钟或地方时钟。同步系统可看做是通信网正常运行的中枢神经系统。

## 2. 数字基带传输通信系统

与频带传输系统相对应，我们把没有调制器/解调器的数字通信系统称为数字基带传输通信系统，如图 1.7 所示。图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。

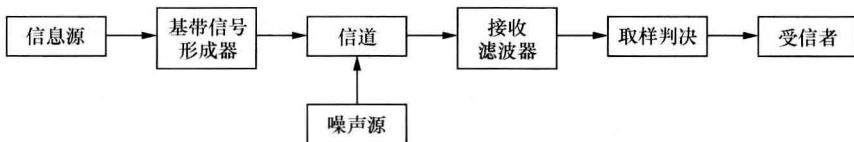


图 1.7 数字基带传输通信系统模型

## 3. 模拟信号数字化传输通信系统

上面讨论的数字通信系统中，信源输出的信号均为数字基带信号。实际上，在日常生活中大部分信号（如语音信号）为连续变化的模拟信号。要实现模拟信号在数字通信系统中传输，则必须在发送端将模拟信号数字化，即 A/D 转换；在接收端需进行相反的转换，即 D/A 转换。实现模拟信号数字化传输的通信系统如图 1.8 所示。



图 1.8 模拟信号数字化传输通信系统模型

### 1.2.4 数字通信的主要优缺点

模拟通信在历史上曾经占据过主导地位。但近 30 年来，随着超大规模集成电路工艺的成熟以及计算机技术和数字信号处理技术的充分发展，数字通信发展迅速，大多数的模拟通信系统已被数字通信系统所取代。尽管在未来一段时间内数字通信系统还不能完全取代模拟通信系统，但通信朝着数字化方向发展是不会改变的，这是由数字通信和模拟通信自身的特点所决定的。

数字通信比模拟通信更具有优势，主要表现在以下几个方面：

(1) 抗干扰能力强，且噪声不积累。数字通信系统中传输的是离散取值的数字波形，接收端的目标不是精确地还原被传输的波形，而是从受到噪声干扰的信号中判决出发送端所发送的是哪一个波形。例如二进制数字“1”、“0”信号可以分别用高电平脉冲和零电平脉冲的波形表示。在接收这样的信号时，只需在规定的时刻判断信号的有无即可。这种方法就是数字信号的抽样判决方法。把抽样所得数值与某一规定的电平进行比较，来判断信号的有无，从而恢复原来的发送波形，消除在传输信道上叠加的噪声。在远距离传输时，为了弥补传输的损耗，在传输线路上都设有中继站对信号进行再生放大。用上述方法恢复原来的发送波形，就可以去除在前面传输线路上加入的噪声，即使中继站再多也不会有噪声的积累。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原信号波形，一

且信号叠加上噪声，即使噪声很小，也是很难消除的。

(2) 传输差错可控。在数字通信系统中，由于采用了信道编码技术，因此在传输过程中出现的错误在接收端能被发现并且被纠正，降低了误码率，提高了传输质量。信道编码越复杂，检错、纠错能力就越强，也越能保证通信信号的质量。当模拟信号受到噪声的干扰时，要保证通信信号的质量，就不那么容易了。数字移动通信的语音质量之所以比模拟系统好，采用编码技术是一个重要原因。

(3) 易于加密。数字信号的特殊形式，使得信息加密变得十分容易。例如把信息比特流按一定的长度分组，用相同长度的一个比特序列（称为密钥）与这些分组进行模二加，便完成了信息的加密。在接收端，用相同的密钥与接收到的序列模二加，就恢复出原来的信息序列。数字移动通信中的 GSM 就是采用这种方法对信息加密的，密钥长度为 114bit。模拟信号虽然也可以加密，但操作起来要复杂得多。

(4) 易于集成，使通信设备微型化、重量轻。

(5) 便于用现代数字信号处理（DSP）技术对数字信息进行处理、变换、存储。这种数字处理的灵活性表现为可以将来自不同信源的信号综合到一起进行传输。

数字通信相对于模拟通信来说，主要有以下两个缺点：

(1) 一般需要较大的传输带宽。以电话为例，一路数字电话一般要占据约 20~60kHz 的带宽，而一路接近同样语音质量的模拟电话仅占用约 4kHz 带宽。

(2) 需要严格的同步系统。数字通信中，要准确地恢复信号，必须要求接收端和发送端保持严格同步。因此，数字通信系统及设备一般都比较复杂。

但是，随着微电子技术、计算机技术的广泛应用以及超大规模集成电路的出现，数字通信系统的设备复杂程度大大降低。同时，高效的数据压缩技术以及光纤等大容量传输媒质的使用正逐步使带宽问题得到解决。因此，数字通信是现代通信的发展方向。

## 1.3 通信系统的分类及通信方式

### 1.3.1 通信系统的分类

通信系统的分类方法很多，这里仅讨论几种较常用的分类方法。

#### 1. 按通信业务分类

根据通信业务的类型不同，通信系统可以分为电报通信系统、电话通信系统、数据通信系统、图像通信系统等各种通信系统。这些通信系统可以是专用的，也可以是兼容或并存的。由于电话通信网最为发达普及，因而其他通信业务常常借助于公用电话通信网传输。例如，电报通信通常是从电话话路中划分出一部分频带传送，或者是用一个话路传送多路电报。综合业务数字通信网适用于各种类型业务的消息传输。

#### 2. 按调制方式分类

根据信道中所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（带通或调制）传输系统。基带传输是将未经调制的信号直接传送，如市内电话、有线广播等。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。应当指出，在实际使用时常常采用复合的调制方式，即采用不同调制方式进行多级调制。



表 1-1 常见调制方式及用途

		调制方式	用途举例
连续波调制	线性调制	常规双边带调幅 (AM)	广播
		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、数据传输
		残留边带调幅 (VSB)	电视广播、数据传输、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)	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、 $\Delta M$ )	军用、民用数字电话
		差分脉码调制 (DPCM)	电视电话、图像编码
		其他语音编码方式 (ADPCM)	中速数字电话

### 3. 按信号特征分类

信号可以分为模拟信号和数字信号，因此按照信道中所传输的信号是模拟信号还是数字信号，相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

### 4. 按传输媒质分类

按传输媒质，通信系统可分为有线通信系统和无线通信系统两大类。所谓有线通信是用导线（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。所谓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

按通信设备的工作频率或波长不同，分为长波通信、中波通信、短波通信、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

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8}{f}$$

式中， $\lambda$  为工作波长 (m)； $f$  为工作频率 (Hz)； $c$  为光速 (m/s)。