

HZ Books
华章教育



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校电子信息与电气学科系列规划教材

通信原理

第2版

韩声栋 蒋铃鸽 刘伟 刘静 编著

Principles of
Communications



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



普通

及规划教材

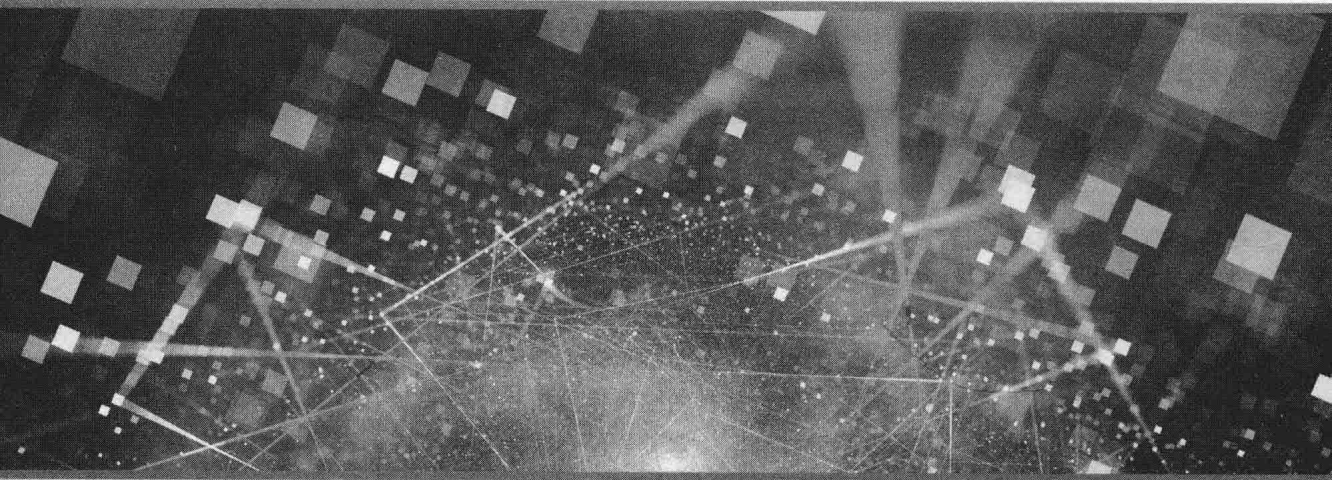
PREFACE

高等院校

规划教材

通信原理

第2版



韩声栋 蒋铃鸽 刘伟 刘静 编著



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

通信原理 / 韩声栋等编著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2017.8
(高等院校电子信息与电气学科系列规划教材)

ISBN 978-7-111-57730-0

I. 通… II. 韩… III. 通信原理—高等学校—教材 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 198880 号

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书通过对模拟和数字通信系统工作原理的讲述及其性能分析, 阐述通信基本理论。主要内容包括: 随机信号和噪声分析、模拟调制方法、模拟信号数字化、数字基带传输、均衡原理、数字调制技术、纠错编码和最佳接收方案。全书叙述严谨, 物理概念清楚, 数学分析详细, 方便阅读。每章均有必要的例题和适量的习题, 便于教学使用。本书适合作为通信工程、电子工程和信息工程等专业教科书, 也可以作为 IT 领域研发人员的参考书。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 王颖 余洁

责任校对: 李秋荣

印刷: 北京诚信伟业印刷有限公司

版次: 2017 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

开本: 185mm×260mm 1/16

印张: 20.75

书号: ISBN 978-7-111-57730-0

定价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

通信原理是信息与通信工程专业的一门主干专业课,主要讲述通信系统如何传输信息,以及如何传输得更好。该课程内容覆盖信息传输必需的共性问题,而把各种通信系统具体的个性问题留给后续专业课。通信原理是进入信息传输领域学习的一门重要基础课程。

本教材是普通高等教育“十一五”国家级规划教材《通信原理》2008年版的修订本。依据多年教学实践,本次修订对原版教材内容进行了梳理与完善。基于本书以理论研究为主,因此删除了一些与实现电路有关的部分,新增了随机信号的统计特性,眼图,正交信号分析以及第11章内容。本教材适合在64学时内学完,适当删减后也适合在48学时内学完。本书每章备有适量习题,可供练习使用,此次修订也对部分习题进行了增减和更新。学习本课程必要的先修课程包括信号与线性系统、通信电子线路,以及工程数学概率论。本书也可供IT领域相关研发人员参考。

全书共分11章。第1章简述通信系统模型,介绍通信理论的重要概念。第2章介绍随机信号分析方法,主要讲述平稳随机过程,这是后续通信系统性能分析的基础。第3章讲解模拟调制系统的工作原理及其抗噪声性能分析。第4章叙述模拟信号数字化方法,重点是分析PCM的取样、量化和编码过程。第5章阐述数字基带传输的基本原理,包括码间干扰问题、奈奎斯特准则、部分响应信号和均衡技术。第6章和第7章论述最佳接收原理,内容涉及匹配滤波器、信号检测原理和相关接收机等。第8章讨论数字调制的带通传输方法,重点讲解几种典型的数字调制技术。第9章主要解决通信中接收端同步信号获取的问题,包括本地载波的提取、数字位同步产生和帧同步方法。第10章介绍信道编码,讲述纠错编码的基本方法,包括线性分组码、循环码和卷积码。第11章对现代通信中应用非常广泛的正交频分复用(OFDM)技术作了介绍。

《通信原理》是我校电子信息和电气工程学院使用多年的教材。曾于1994年由水利电力出版社出版《现代通信原理》(王维一主编)一书,2008年版《通信原理》中的第1~4章就是在该书基础上修订而成的,其余章节则重新编写。其中,第5~7章和8.1~8.6节由韩声栋编写,8.7节和第9章由刘伟编写,第10章由蒋铃鸽编写。全书由韩声栋统稿和审校。

本次修订版教材,第1~3章和第10章和附录B由蒋铃鸽修订,第4~6章和第9章由刘伟修订,第7~8章和第11章以及附录A、C由刘静修订。其中5.7节关于眼图的波形图由袁炎提供,在此表示感谢。

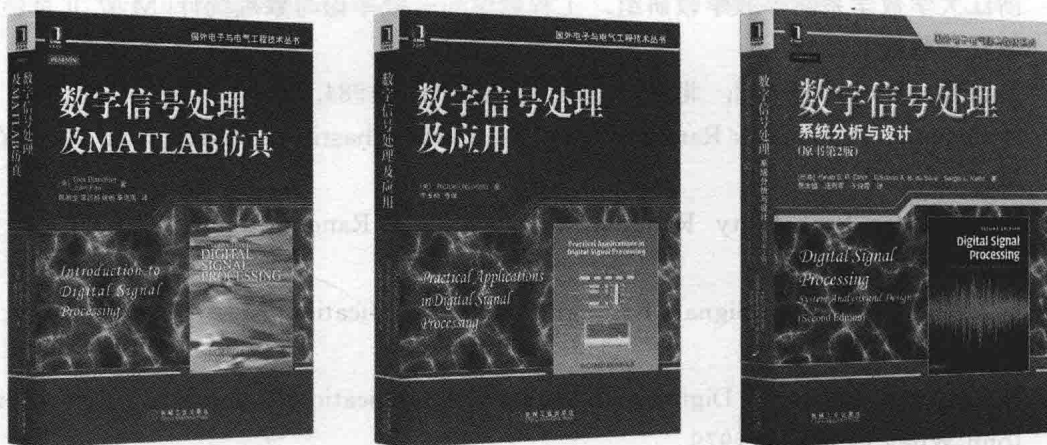
本书的修订获得上海市精品课程建设项目和上海交通大学本科教学改革研究项目的资助。编者在此深表谢意!

由于水平有限,不妥之处敬请批评指正。

编者

2017年5月于上海交通大学

推荐阅读



数字信号处理及MATLAB仿真

作者：Dick Blandford 等 译者：陈后金 等 书号：978-7-111-48388-5 定价：95.00元

本书是美国伊凡斯维尔大学电子与计算机工程专业的DSP课程教材，注重理论与应用相结合，前7章重点讲述数字信号处理基础理论和知识，包括DSP的概述、线性信号和系统概念、频率响应、抽样和重建、数字滤波器的分析和设计、多速率DSP系统；后4章侧重于DSP应用，包括数字滤波器的实现、数字音频系统、二维数字信号处理和小波分析。本书可作为电子信息、通信、控制、仪器仪表等相关专业本科生的DSP课程教材，对初级DSP工程师也是一本实用的参考书。

数字信号处理及应用

作者：Richard Newbold 等 译者：李玉柏 等 书号：978-7-111-51340-7 定价：119.00元

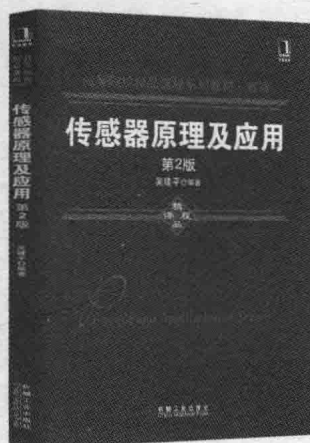
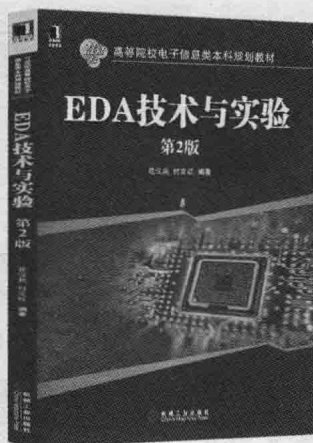
本书基于真实设备与系统，研究如何进行数字信号处理的软硬件设计与实现，详细阐述了模拟和数字信号调谐、复数到实数的变换、数字信道化器的设计以及数字频率合成技术，并重点讨论了多相滤波器（PPF）、级联的积分梳状（CIC）滤波器、数字信道器等业界常用的一些的信号处理应用。本书适合即将进入信号处理领域的大学毕业生，也适合有一定DSP设计经验的业界工程师阅读。

数字信号处理：系统分析与设计（原书第2版）

作者：Paulo S. R. Diniz 等 译者：张太镒 等 ISBN：978-7-111-41475-9 定价：85.00元
英文版 ISBN：978-7-111-38253-9 定价：79.00元

本书全面、系统地阐述了数字信号处理的基本理论和分析方法，详细介绍了离散时间信号及系统、傅里叶变换、z变换、小波分析和数字滤波器设计的确定性数字信号处理，以及多重速率数字信号处理系统、线性预测、时频分析和谱估计等随机数字信号处理，使读者深刻理解数字信号处理的理论和设计方法。本书不仅可以作为高等院校电子、通信、电气工程与自动化、机械电子工程和机电一体化等专业本科生或研究生教材，还可作为工程技术人员DSP设计方面的参考书。

推荐阅读



模拟电子电路基础

作者：堵国樑 吴建辉 等 ISBN：978-7-111-45504-2 出版时间：2014年1月 定价：45.00元

本书是在多年教学改革的基础上编写而成的，其基本原则为“以电路分析为主线，以设计应用为目的”。编写思路采用了从宏观到微观，从对集成器件外特性的了解、应用，引导到对内电路研究学习的兴趣；以单元电路的分析为铺垫，强调电子系统设计的思路；以工程教育理念为导向，理论联系实际，教材内容落实到具体的工程项目应用中。本书主要从应用角度介绍器件、集成电路以及电子电路的基本概念、基本原理、性质与特点，通过电子电路具体分析方法的介绍，培养电子电路的设计能力。本书共分11章，内容包括：绪论，运算放大器及其线性应用，运算放大器的非线性应用，半导体器件概述，基本放大电路，负反馈放大电路，集成运算放大器，正弦波产生电路，功率电路，应用电路设计分析，门电路。

EDA技术与实验（第2版）

作者：花汉兵 付文红 ISBN：978-7-111-42654-7 出版时间：2013年8月 定价：35.00元

为适应教学改革的需要，培养学生能力的循序渐进的过程，对第1版内容进行了修订，从而实现了从基础电路设计、综合电路设计再到创新型设计的教学模式，有利于在培养学生基本实践能力的基础上，培养了他们的创新意识和创新能力。该第2版精心构建基础与前沿、经典与现代有机结合的实践教材内容，结合大学生电子设计竞赛，修订EDA技术与实验内容，使学生掌握现代电子设计方法，实现教材内容与科研、工程、社会应用实践密切联系。本着与时俱进的原则，采用了一些在技术上更为先进的软件和设备。如可编程器件由原来的Cyclone系列更新为CycloneIII系列，并介绍了QuartusII软件的使用。

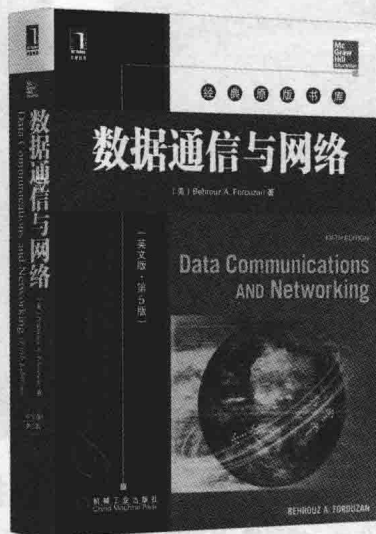
传感器原理及应用（第2版）

作者：吴建平 等 ISBN：978-7-111-36554-9 出版时间：2012年2月 定价：36.00元

本书第1版自2009年1月面世以来，得到广大同行、专家和读者的支持和肯定，并先后4次重印。为提高教材的可读性和实用性，本书对上一版中的部分章节进行了调整：将“超声波传感器”归入第7章；将“热电式红外传感器”并入第12章；第11章为射线传感器，主要讨论核辐射探测器的原理和应用；本书还特别增加了第13章集成智能传感器，主要讨论现代新型的集成器件。另外，本书还增加了部分传感器的应用实例。

读者可以在本书配套的精品课程网站中找到更多的资料。本书同时为教师提供教学课件及配套习题答案。

推荐阅读



数字通信（原书第3版）

作者：Ian A. Glover 等 译者：关欣 等 ISBN：978-7-111-44435-0 定价：119.00元

本书是Ian A. Glover和Peter M. Grant两位教授20多年在英国巴斯大学、布拉德福大学和爱丁堡大学从事教学和科研成果的总结。该书全面、系统地论述了数字通信的基本理论、关键技术、主要应用以及通信网的最新发展。主要内容包括信号、噪声与系统的性质以及有关的数学模型的概述，确保数字通信系统性能良好所需采用的模数转换、编码与调制技术，噪声的物理特性以及单级或多级传输链路末端的CNR的预测，通信系统的计算机仿真，同时还讨论了现代数字电话、陆地和卫星微波系统、蜂窝移动无线系统、视频编码系统以及交换技术与电信网等。在第3版中，内容与当前的最新技术更加保持同步，着重反映了数字通信领域最近5年的发展成果，特别是第21章介绍网络内容时新增了FDDI、DQDB、MIMO、UWB等内容。

本书可作为通信工程、电子与电气工程专业的本科生或研究生教材，也可供通信工程技术人员参考。

数据通信与网络（英文版·第5版）

作者：Behrouz A. Forouzan ISBN：978-7-111-42743-8 定价：89.00元

本书以因特网五层模型为框架，以形象直观的描述手法，详细地介绍了数据通信和网络领域的基础知识、基本概念、基本原理和实践方法，堪称数据通信和网络方面的经典著作。本书适合作为计算机专业有关数据通信和网络课程的本科生或研究生的教材或教学参考书，也可作为相关的研究人员和技术人员的参考书。

目

录

CONTENTS

前言

第1章 通信系统概论 1

1.1 通信系统的模型 1

1.1.1 通信系统的组成 1

1.1.2 模拟通信、数字通信和数据通信 2

1.2 通信系统的质量指标 4

1.2.1 模拟通信系统的质量指标 4

1.2.2 数字通信系统的质量指标 4

1.3 传输信道 6

1.3.1 无记忆信道 6

1.3.2 恒参信道 8

1.3.3 变参信道 10

1.4 信息的度量与信道容量 11

1.4.1 信息的度量 11

1.4.2 信道容量 14

习题 17

第2章 随机信号和噪声 19

2.1 随机过程基本概念 19

2.1.1 随机过程的定义 19

2.1.2 随机过程的概率分布函数和概率密度函数 20

2.1.3 随机过程的数字特征函数 21

2.1.4 随机过程分类 25

2.2 广义平稳过程及各态遍历性 26

2.2.1 广义平稳过程相关函数的性质 26

2.2.2 时间平均及各态遍历性 29

2.3 随机过程的功率谱密度 30

2.3.1 功率谱密度的定义 31

2.3.2 功率谱密度与自相关函数的关系 32

2.3.3 功率谱密度的性质 33

2.3.4 互功率谱密度及其性质 34

2.4 线性系统对随机信号的响应 35

2.4.1 输出过程统计特性 35

2.4.2 输出输入过程相互关系 36

2.4.3 线性组合网络 36

2.5 高斯过程和白噪声过程 37

2.5.1 高斯过程 37

2.5.2 白噪声过程 39

2.6 离散时间随机信号 43

2.6.1 相关函数和协方差函数 43

2.6.2 相关函数(序列)的Z变换以及功率谱 45

2.6.3 随机序列通过线性系统 46

2.7 窄带随机过程 47

2.7.1 平稳窄带过程的正交表示 47

2.7.2 窄带高斯过程的包络和相位表示 51

2.8 正弦信号加窄带噪声的包络和相位 53

2.8.1 包络 $A(t)$ 的分布 54

2.8.2 相位 $\psi(t)$ 的分布 55

习题 56

第3章 模拟调制系统 64

3.1 幅度调制 64

3.1.1	双边带调制	65	4.5.1	DM 的原理	120
3.1.2	振幅调制	67	4.5.2	DM 的量化噪声	122
3.1.3	单边带调制	70	4.5.3	改进型 DM	123
3.1.4	残留边带调制	73	4.6	差分脉冲编码调制	125
3.2	幅度调制系统的抗噪声性能	74	4.6.1	DPCM 编码原理	125
3.2.1	基带系统	74	4.6.2	预测器	127
3.2.2	DSB 系统的抗噪声性能	76	4.6.3	自适应量化	128
3.2.3	SSB 系统的抗噪声性能	77	4.6.4	自适应差分脉冲编码调制	130
3.2.4	AM 系统的抗噪声性能	78	习题	131	
3.3	角度调制	81	第 5 章 数字基带传输和时域均衡	134	
3.3.1	角度调制的一般概念	81	5.1	基带传输码型	134
3.3.2	频率调制	82	5.1.1	基本码型	134
3.3.3	FM 信号的产生和解调	85	5.1.2	数字基带信号的功率谱	135
3.3.4	相位调制	88	5.1.3	基带码型变换	137
3.4	角度调制系统的抗噪声性能	89	5.2	数字基带传输系统及符号间干扰	140
3.4.1	角度调制系统的输出信噪比	90	5.2.1	数字基带传输系统的组成	140
3.4.2	角度调制系统的门限效应	93	5.2.2	符号间干扰分析	140
3.5	加重技术	94	5.3	无 ISI 的带限信号设计——奈奎斯特第一准则	141
3.6	频分多路复用	96	5.3.1	最小带宽	142
习题		98	5.3.2	升余弦频谱	143
第 4 章 模拟信号的数字传输		102	5.4	部分响应信号	145
4.1	模拟信号的取样	102	5.4.1	双二进制信号系统	145
4.1.1	取样定理	102	5.4.2	修正双二进制信号系统	147
4.1.2	带通信号的取样	103	5.4.3	部分响应系统	149
4.2	模拟信号的量化	104	5.5	时域均衡及其最佳准则	151
4.2.1	量化原理	104	5.5.1	时域均衡原理	152
4.2.2	均匀量化	105	5.5.2	两种最佳准则	154
4.2.3	非均匀量化	107	5.6	横向均衡器的结构	155
4.3	编码	110	5.6.1	前向均衡器	155
4.3.1	A87.6/13 折线压缩律	111	5.6.2	反馈均衡器	155
4.3.2	码元的排列	112	5.6.3	前向和反馈组合均衡器	156
4.4	PCM 通信系统	115	5.6.4	判决反馈均衡器	156
4.4.1	PCM 通信系统的组成	115	5.6.5	前向与判决反馈结合的均衡器	157
4.4.2	PCM 信号的带宽	116			
4.4.3	PCM 系统的噪声	116			
4.4.4	PCM 时分复用	118			
4.5	增量调制	120			

5.7 眼图	157	第 8 章 数字信号带通传输	204
习题	159	8.1 二进制幅度键控	204
第 6 章 匹配滤波器	162	8.1.1 2ASK 信号的产生及其 功率谱	205
6.1 最大信噪比准则——匹配 滤波器	162	8.1.2 2ASK 信号解调	207
6.1.1 信噪比的表达	163	8.2 二进制频移键控	210
6.1.2 MF 的导出	163	8.2.1 2FSK 信号的产生及其 功率谱	210
6.2 匹配滤波器的性质	164	8.2.2 2FSK 信号解调	213
6.3 时间相关函数	167	8.3 二进制移相键控	216
6.3.1 MF 等效于相关器	167	8.3.1 BPSK 信号的产生和 功率谱	216
6.3.2 相关积分的定义及性质	167	8.3.2 BPSK 信号解调	217
6.3.3 相关系数	169	8.3.3 二进制差分移 相键控	218
6.4 匹配滤波器的计算	170	8.3.4 二进制数字调制系统的性能 比较	222
6.5 有色噪声条件下的匹配 滤波器	174	8.4 多进制数字调制	223
6.6 匹配滤波器的实现	175	8.5 四相移相键控	226
6.6.1 动态滤波器	175	8.5.1 QPSK 信号的时域表示和 频谱	226
6.6.2 用横向滤波器实现	177	8.5.2 四相绝对移相键控	228
6.6.3 MF 的近似实现	178	8.5.3 四相相对移相键控	229
习题	180	8.5.4 QPSK 的误码性能	231
第 7 章 最佳接收	183	8.6 正交幅度调制	232
7.1 判决理论	183	8.6.1 QAM 信号的时域表示和 功率谱	233
7.1.1 最大后验概率准则	183	8.6.2 16QAM 的调制与解调	236
7.1.2 似然比检验	184	8.6.3 相位模糊与差分编码	238
7.1.3 单次观测信号检测	184	8.6.4 比特差错性能	239
7.1.4 多次观测	186	8.6.5 部分响应正交幅度调制	239
7.1.5 多元信号检测	187	8.7 最小频移键控	240
7.2 确知信号的最佳接收	188	8.7.1 三个特点的分析	241
7.2.1 确知信号的最佳接收—— 相关接收机模型	188	8.7.2 MSK 信号的正交表示及 产生	243
7.2.2 数字通信接收机的性能	190	8.7.3 MSK 信号解调	244
7.2.3 相关接收的实现	194	8.7.4 MSK 信号功率谱	245
7.3 随相信号的最佳接收	194	习题	246
7.3.1 随相信号的最佳接收机 结构	195		
7.3.2 正交接收机的等效实现	197		
7.4 准最佳接收	198		
习题	201		

第 9 章 同步	248	10.1.1 差错控制方式和纠错码	
9.1 锁相环的基本知识	248	分类	276
9.1.1 模拟锁相环	249	10.1.2 差错控制编码的	
9.1.2 数字锁相环	251	基本原理	277
9.2 载波同步	252	10.2 常用检错码	279
9.2.1 插入导频法	252	10.2.1 奇偶校验码	279
9.2.2 抑制载波双边带信号的		10.2.2 行列校验码	279
载波提取	253	10.2.3 恒比码	280
9.2.3 多进制信号的		10.3 线性分组码	281
载波提取	256	10.3.1 汉明码	281
9.3 载波同步系统的性能	257	10.3.2 监督矩阵 H	283
9.3.1 稳态相差	257	10.3.3 生成矩阵 G	284
9.3.2 随机相差	258	10.3.4 伴随式译码	285
9.3.3 同步建立和保持时间	260	10.4 循环码	286
9.4 码元同步	261	10.4.1 基本概念与原理	286
9.4.1 非线性变换法	262	10.4.2 循环码的编码器	291
9.4.2 数字锁相环法	262	10.4.3 循环码的译码器	293
9.4.3 超前-滞后门法	264	10.5 卷积码	295
9.5 码元同步系统的性能	266	10.5.1 卷积码基本概念与结构	296
9.5.1 相位误差	266	10.5.2 卷积码的描述方法及	
9.5.2 同步建立时间	266	编码	297
9.5.3 同步保持时间	267	10.5.3 卷积码的维特比译码	300
9.5.4 同步带宽	267	习题	303
9.6 帧同步	268	第 11 章 正交频分复用系统	306
9.6.1 起止式同步	268	11.1 OFDM 技术基本概念	306
9.6.2 采用特殊字符建立		11.2 OFDM 系统的工作原理	307
帧同步	268	11.3 OFDM 系统的主要特点	310
9.7 帧同步系统的性能	271	11.4 OFDM 的关键技术	311
9.7.1 集中插入同步法的		习题	314
性能指标	272	附录 A Q 函数、误差函数和	
9.7.2 帧同步的保护	273	互补误差函数	315
习题	274	附录 B 随机变量的统计平均	317
第 10 章 差错控制编码	276	附录 C 英汉名称对照表	319
10.1 基本概念	276	主要参考文献	321

通信系统概论

本章目的是介绍通信系统的基础和简要叙述信息论的基本概念，其内容有：各种通信系统的组成及特点；评估通信系统的性能指标；讨论各种类型信道的共同特性，以及造成传输信号失真的原因。最后，扼要介绍信息的度量和信道容量等基本知识。

1.1 通信系统的模型

通信是指消息的传递和交换，即互通信息。在现代通信中，要传送的消息有语言、文字、图像、符号、数据等各种类型。利用“电”来传递消息的途径有：有线通信、短波超短波通信、微波通信、卫星通信、光纤通信和计算机通信等多种方式。尽管通信的对象和类型有多种形式，然而，我们将按照通信的目的及传输信号的性质，对典型通信系统的各个组成部分进行分析。

1.1.1 通信系统的组成

图 1.1-1 表示一个高度概括的通信系统模型。下面介绍图中各个方框的意义。

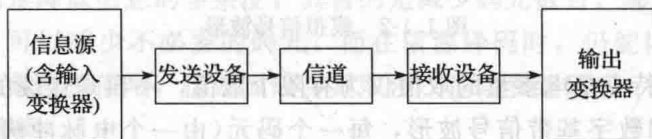


图 1.1-1 通信系统模型

信息源(含输入变换器)：简称信源，它是产生传送消息的源。例如，人类活动的语言、电视图像、电传报文或计算机数据等。信源发出消息的形式，可以是连续的，也可以是离散的。如果信源输出的消息是非电的，必须通过输入变换器把它转变为电信号。例如，电话通话时，话机就是变换器。由变换器输出的信号称为消息信号或者基带信号。话机输出的基带信号的频率通常限制在 $300\sim 3400\text{Hz}$ ，电视图像信号的频率在 $0\sim 6\text{MHz}$ 内。信号所占的频率范围，称为信号带宽。

发送设备：它的功能是把消息信号经过处理变换后送入信道。有时也可以由输入变换器把信号直接送入信道传输，这种传输称为基带传输。基带信号的处理变换包括信号的放大、滤波和调制，其中最重要的是调制。所谓调制，就是把基带信号的频谱搬移到一个较高的频谱范围内，以适应信号在信道内有效地传输。

信道：它是传输各种电磁波的媒质。最常见的有有线电缆、无线电传播的自由空间。对于光纤通信和卫星通信系统，光缆和人造卫星与地面站之间的空间也是传输信息的信道。尽管随通信模式不同有各种类型的信道，但它们都有共同特点：信号经过信道传输后，其波形将发生失真，并受到干扰噪声的污染。

接收设备：它的功能是从接收信号中提取所需消息信号，并把它变换到适合于输出变换器所要求的信号形式。同样，其中解调(调制的逆变换)是最重要的。

输出变换器：能把基带信号转变为用户能接受的信号形式。扬声器、电传打字机和电视机等是输出变换器的实例。

1.1.2 模拟通信、数字通信和数据通信

通信所传输的消息是多种多样的。然而，表示各种消息的传输信号，按其取值特点可以分为两类：模拟信号和数字信号。

模拟信号波形模拟着信源信息的变化，其特点就是电参量(电压或电流的振幅、频率、相位)幅度连续，连续的含义是指在某一取值范围内可以取无穷多个数值。若信号波形相对于时间也连续，则称为连续模拟信号，如图 1.1-2a 所示；而图 1.1-2b 是对图 1.1-2a 以等间隔 T 进行抽样的结果，时间上是离散的，但是由于幅度取值仍然具备连续变化性质，所以可称为离散模拟信号。

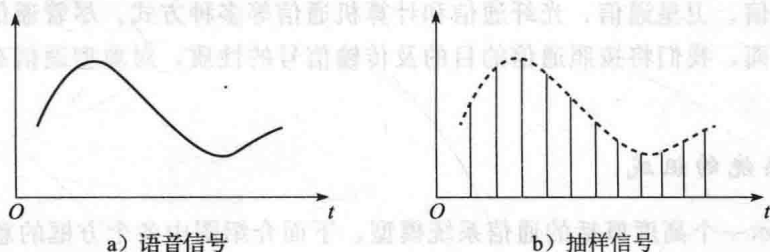


图 1.1-2 模拟信号波形

数字信号波形的特点是电参量的取值仅为有限个数值，不再是连续的，而是离散的。例如图 1.1-3a 为二进制数字基带信号波形，每一个码元(由一个电脉冲构成)的幅度只有 $+A$ 和 $-A$ 两种取值，分别代表数字信号“1”和“0”。图 1.1-3b 为二进制数字相移键控(BPSK)已调信号波形，在每个调制码元周期里改变载波的相位参数，只有 0 和 π 两种取值，对应数字信号“1”和“0”。

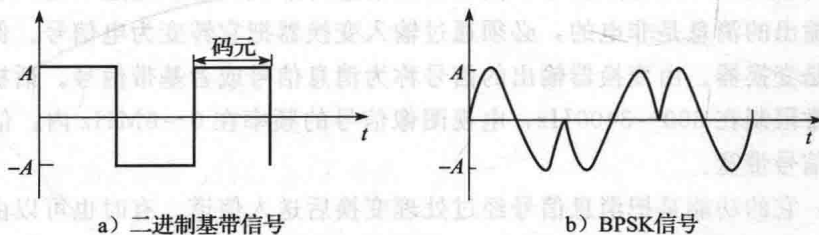


图 1.1-3 数字信号波形

1. 模拟通信

在通信信道中用模拟信号传送消息的通信方式，称为模拟通信。模拟通信系统的组成与图 1.1-1 所示相仿，其中发送设备主要是模拟调制器，而接收设备是相应的解调器。有关模拟调制和解调原理的内容在第 3 章中详细讨论。

2. 数字通信与数据通信

数字通信和数据通信都是用数字信号来传送消息的。通常，数据通信从信源发出的信号本身就是数字信号，而数字通信往往要先对信源发出的模拟信号进行模数转换，变为数字信号后再进行处理传输。

由于数字通信相对于模拟通信有下列优点：

- 1) 数字信号便于产生、存储、交换，也便于与计算机联用；
- 2) 在干扰情况下，数字信号易于检测，且可在中继站再生信号，消除传输中波形误差的累积；
- 3) 便于实现抗干扰和保密编码，以提高通信的可靠性和保密性；
- 4) 便于实现电路集成化，也易于利用现代固体器件和计算技术的研究成果。

因此，从模拟通信过渡到数字通信是现代通信的目标之一。

图 1.1-4 表示一个数字通信系统模型。它与图 1.1-1 的区别是增加了信源编码、信源译码、信道编码及信道译码，并且调制器和解调器都是采用数字调制和数字解调技术。

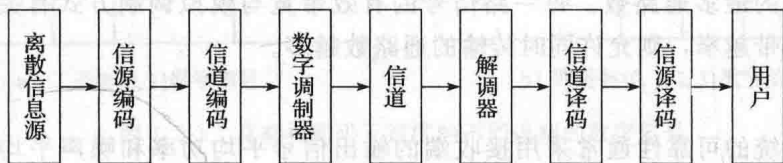


图 1.1-4 数字通信系统模型

信源编码的作用是降低信息的多余度，其目的是减少码元数目，降低码元速率。信息码流经过信源编码后，可以减少不必要的码元，而在信源译码时，仍能恢复和辨认。另一方面，如果信源输出的是模拟信号，信源编码将其取样、量化和编码后，转换成数字信号，称为模/数转换(A/D转换)。

信道编码又称纠错编码(或称抗干扰编码)，其作用是在信源编码输出的码流中(数字信号)，人为地按一定规则加入多余码元，以便在接收端信道译码时，发现错码或者纠正错码，从而提高通信的可靠性。

对于一个具体的数字通信系统，信道编码、译码视需要而用，并不是所有数字通信系统都设置。当然，有些通信系统还需要附加保密，这时，在系统的发送端和接收端，应分别增设加密器和解密器装置。此外，在任何数字通信系统中，同步系统是必不可少的，图 1.1-4 中并未画出。

数字通信与数据通信在习惯上的区分方法是：将模拟信息经数字化处理后，用数字信号的形式来传送的通信方式，称为数字通信；而把信源本身发出的数字形式的消息(如电子计算机或其他数字终端作为信源发出的数据、指令等)，不管用何种形式的信号来传输这类消息的通信方式，均称为数据通信。

数据通信是电子计算机与通信相结合的一种通信方式，它利用快速传输数据的通信技术和数据处理、存储的计算机技术，给用户及时、准确的信息。数据通信的发展使计算机的用户可以远距离使用计算机，计算机也可以远距离进行实时数据收集和对系统进行实时控制。这就使计算机的作用超越地理位置的限制，大大地扩大了计算机的应用范围。20世纪60年代末，有名的美国 ARPA 计算机网诞生，初次实现了位于不同地点、不同种类的计算机与计算机的通信和资源共享(计算机资源包括硬件、软件和数据)，从而使计算机与通信的

结合更加紧密,形成了计算机通信网络。现在,计算机通信已得到飞速发展,其应用遍布社会生产和生活的各个方面。

1.2 通信系统的质量指标

通信系统的质量指标通常包括电气性能、工艺结构和使用维修等方面。但从传输信号角度看,其质量指标主要为有效性和可靠性。通信的有效性是指传输信息的速率,也即在给定的频带内能够以何种速率传输信息。而通信的可靠性则表示准确通信的程度。然而,在设计中有效性和可靠性这两个要求往往互相矛盾。通常只能在满足一定可靠性的指标下,尽可能提高通信系统的有效性。

1.2.1 模拟通信系统的质量指标

1. 有效性

对模拟通信来说,信号传输的有效性通常可用有效传输频带来衡量,即在指定信道带宽内允许同时传输的最多通路数。每一路信号的有效带宽与模拟调制方式有关。在相同条件下,每路所占频带越窄,则允许同时传输的通路数越多。

2. 可靠性

模拟通信系统的可靠性通常采用接收端的输出信号平均功率和噪声平均功率之比来衡量,称为功率信噪比,简称信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR),记作 S/N 。

定义信噪比为:

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{输出信号平均功率}}{\text{噪声平均功率}}$$

信噪比常采用的计量单位为分贝。

定义信号功率放大 10 倍作为一个计量单位,称为贝尔。因为实际使用时该单位常显过大,故采用十分之一贝尔作为计量单位,称为分贝(decibel, dB)。分贝描述的是功率比值,是以 10 为底的对数。

$$\text{分贝} = 10 \lg \text{功率比}$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{dB}} = 10 \lg \left(\frac{S}{N}\right) \text{分贝}$$

在相同条件下,通信系统的输出信噪比越高,通信质量就越好,互通信息就越准确。例如,一般民用电话通信的 $S/N=40\text{dB}$ 时,能听清 95% 以上的讲话内容。对电视节目而言,当输出信噪比达到 $S/N=40\sim 60\text{dB}$ 时,能够将画面细节看清楚。

分贝反映的功率比值是一个相对单位,在实际工程应用中为了给出绝对电平定量的概念,又引入了分贝毫瓦(dBm)的计量单位,表达的是相对于 1mW 的功率电平。

$$\text{dBm 值} = 10 \lg \frac{\text{某点功率值(以 mW 计)}}{1\text{mW}}$$

1.2.2 数字通信系统的质量指标

1. 有效性

数字通信系统的有效性可用码元速率或符号速率来衡量。在数字信号中,每个二进制信

号的取值为“1”或“0”，每个“1”或“0”称为一个码元。每一个码元(或符号)用一个电脉冲表示，各码元都占有相等的时间间隔，这个间隔称为码元宽度。

(1) 码元速率 R_B

每秒钟传送码元的数目称为码元速率。若码元宽度为 T ，则码元速率

$$R_B = \frac{1}{T}$$

码元速率又称符号速率或信号速率。单位为波特(Baud 或 Symbol/s)，可简写为 Bd。

显然码元速率仅由码元宽度 T 决定，而与数字信号的进制数无关。

由图 1.2-1 可见，虽然图中 a 和 b 是不同进制的数字信号，但因为它们的码元宽度 T 相同，所以具有相同的码元速率。假设图中 $T=10\text{ms}$ ，则有 $R_{B2}=R_{B4}=1/T=100\text{Bd}$ 。

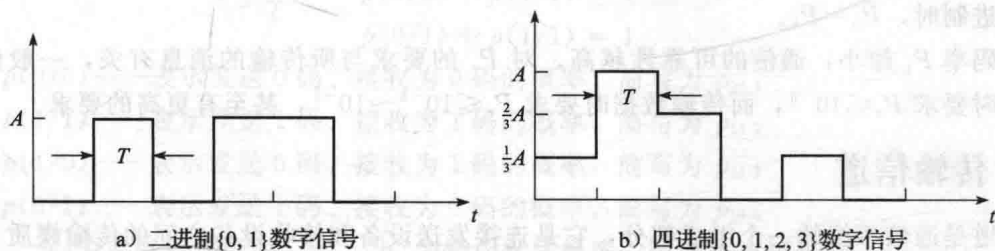


图 1.2-1 具有相同码元宽度的不同进制的数字信号

在数字信号调制过程中，由于码元速率表示一秒钟内调制信号波(即码元)的变换次数，所以又称为调制速率。

(2) 信息速率 R_b

信息速率定义为每秒钟传送的信息量，记作 R_b ，单位为比特/秒，或记为 bit/s。对于二进制信号，由于一个码元含有 1bit 信息量，所以信息速率在数值上就等于码元速率，但单位不同。如图 1.2-1a 中， $R_{B2}=100\text{Bd}$ ， $R_{b2}=R_{B2}=100\text{bit/s}$ 。而对于 N 进制信号，由于一个码元所含信息量大于 1bit，所以多进制的信息速率在数值上大于码元速率。两者之间的关系为

$$R_{bN} = R_{BN} \log_2 N$$

如图 1.2-1b 中， $R_{B4}=100\text{Bd}$ ， $R_{b4}=R_{B4} \log_2 4=200\text{bit/s}$ 。

(3) 频带利用率

数字通信有效性指标除了用码元速率和信息速率表征外，还可以用频带利用率来衡量。频带利用率是指单位频带内能够传送的码元速率，即每赫兹波特数。则频带利用率

$$\eta_B = \frac{R_B}{\text{频带宽度}} \quad (\text{Bd/Hz}) \quad (1.2-1a)$$

码元(或符号)除了二进制外，还有多进制。当两个进制数相同的通信系统比较有效性时， η_B 大者，有效性好。而当两个传输进制数不同的系统比较时，可采用折算后的信息速率 R_{bN} 来定义，这时

$$\eta_b = \frac{R_{bN}}{\text{频带宽度}} \quad \left(\frac{\text{b/s}}{\text{Hz}}\right) \quad (1.2-1b)$$

折算公式见后式(1.4-9)。

2. 可靠性

数字通信系统的可靠性由差错率指标来衡量,通常有两种表示方法,即误码率 P_e 和误信率(误比特率) P_b 。

(1) 误码率

$$P_e = \frac{\text{差错码元数}}{\text{传输的码元总数}} \quad (1.2-2a)$$

例如,经过长时间统计,平均传输 10 000 个码元中差错一个码元,则误码率 $P_e = 10^{-4}$ 。

(2) 误信率

$$P_b = \frac{\text{错误消息的比特数}}{\text{传输消息的总比特数}} \quad (1.2-2b)$$

采用二进制时, $P_b = P_e$ 。

误码率 P_e 越小,通信的可靠性越高。对 P_e 的要求与所传输的消息有关,一般传输数字电话时要求 $P_e \leq 10^{-3}$,而传输数据时要求 $P_e \leq 10^{-5} \sim 10^{-6}$,甚至有更高的要求。

1.3 传输信道

信道是通信系统的一个组成部分,它是连接发送设备和接收设备之间的传输媒质,组成传输信号的通路。按照传输媒质,可以分为有线信道(包括架空明线、对称和同轴电缆、光缆)和无线信道(如利用收发天线和自由空间作为媒质)两大类。

通常把传输媒质的信道称为狭义信道,而把发送端调制器输出和接收端解调器的输入端之间的放大、天线电路和传输媒质组成的信道称为广义信道。由于后者传送已调信号,又称调制信道。如果把发送端的调制器和接收端的解调器也包括在内,则称为编码信道。它们之间的关系如图 1.3-1 所示。

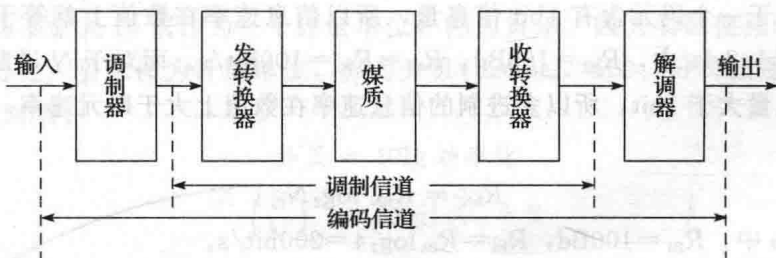


图 1.3-1 调制信道与编码信道

由于信道特性的不完善,信号经信道传输后,往往发生振幅失真和相位失真(或群时延失真),从而造成波形失真。信道除了使信号波形失真外,还存在着各种干扰和噪声,损害传输信号。不管是狭义信道还是广义信道,总可以用一个具有输入端和输出端的网络表示,如图 1.3-2 所示。

1.3.1 无记忆信道

无记忆信道是指信道内只存在起伏噪声,它的输出数字序列码元仅依赖于输入数字序列的相应码元和信道特性,而与前后码元的差错无关。

编码信道传输的是编码后的数字序列码元,大多数的编码信道是无记忆的。无记忆编码