



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会推荐教材
电子信息学科基础课程系列教材



通信原理

(第2版)

李晓峰 周宁 周亮 邵怀宗 朱立东 编著

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会推荐教材
电子信息学科基础课程系列教材

通信原理

(第2版)

李晓峰 周宁 周亮 邵怀宗 朱立东 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书主要讨论通信系统的基础理论、技术与分析方法。全书共 11 章,内容包括绪论、基础知识、模拟传输、数字基带传输、基本的数字频带传输、模拟信号数字化与 PCM、信号空间分析与多元数字传输、现代数字传输技术、多用户与无线通信、信息论基础以及纠错编码等。

本书注重通信系统的理论基础与技术思想,联系工程实践。内容全面,条理分明,叙述清楚,例题与图示丰富,便于教学与自学。

本书可作为高等学校通信工程、信息工程等电子信息类专业的本科生教材与研究生参考书,也可供相关领域的科研和工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

通信原理/李晓峰等编著.--2 版.--北京:清华大学出版社,2014

电子信息学科基础课程系列教材

ISBN 978-7-302-36725-3

I. ①通… II. ①李… 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(2014)第 115906 号

责任编辑:文 怡

封面设计:常雪影

责任校对:李建庄

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:29.75 字 数:738 千字

版 次:2008 年 11 月第 1 版 2014 年 8 月第 2 版 印 次:2014 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:49.00 元

产品编号:050166-01

《电子信息学科基础课程系列教材》
编 审 委 员 会

主任委员

王志功(东南大学)

委员 (按姓氏笔画)

马旭东(东南大学)

王小海(浙江大学)

王 萍(天津大学)

刘宗行(重庆大学)

刘新元(北京大学)

张晓林(北京航空航天大学)

陈后金(北京交通大学)

郭宝龙(西安电子科技大学)

高上凯(清华大学)

徐淑华(青岛大学)

崔翔(华北电力大学)

董在望(清华大学)

蒋宗礼(北京工业大学)

邓建国(西安交通大学)

王诗宓(清华大学)

王福昌(华中科技大学)

刘润华(中国石油大学)

张 石(东北大学)

沈连丰(东南大学)

郑宝玉(南京邮电大学)

柯亨玉(武汉大学)

高小榕(清华大学)

袁建生(清华大学)

傅丰林(西安电子科技大学)

曾孝平(重庆大学)

《电子信息学科基础课程系列教材》 丛书序

电子信息学科是当今世界上发展最快的学科,作为众多应用技术的理论基础,对人类文明的发展起着重要的作用。它包含诸如电子科学与技术、电子信息工程、通信工程和微波工程等一系列子学科,同时涉及计算机、自动化和生物电子等众多相关学科。对于这样一个庞大的体系,想要在学校将所有知识教给学生已不可能。以专业教育为主要目的的大学教育,必须对自己的学科知识体系进行必要的梳理。本系列丛书就是试图搭建一个电子信息学科的基础知识体系平台。

目前,中国电子信息类学科高等教育的教学中存在着如下问题:

- (1) 在课程设置和教学实践中,学科分立,课程分立,缺乏集成和贯通;
- (2) 部分知识缺乏前沿性,局部知识过细、过难,缺乏整体性和纲领性;
- (3) 教学与实践环节脱节,知识型教学多于研究型教学,所培养的电子信息学科人才不能很好地满足社会的需求。

在新世纪之初,积极总结我国电子信息类学科高等教育的经验,分析发展趋势,研究教学与实践模式,从而制定出一个完整的电子信息学科基础教程体系,是非常有意义的。

根据教育部高教司 2003 年 8 月 28 日发出的[2003]141 号文件,教育部高等学校电子信息与电气信息类基础课程教学指导分委员会(基础课分教指委)在 2004—2005 两年期间制定了“电路分析”、“信号与系统”、“电磁场”、“电子技术”和“电工学”5 个方向电子信息科学与电气信息类基础课程的教学基本要求。然而,这些教学要求基本上是按方向独立开展工作的,没有深入开展整个课程体系的研究,并且提出的是各课程最基本的教学要求,针对的是“2+X+Y”或者“211 工程”和“985 工程”之外的大学。

同一时期,清华大学出版社成立了“电子信息学科基础教程研究组”,历时 3 年,组织了各类教学研讨会,以各种方式和渠道对国内外一些大学的 EE(电子电气)专业的课程体系进行收集和研究,并在国内率先推出了关于电子信息学科基础课程的体系研究报告《电子信息学科基础教程 2004》。该成果得到教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会的高度评价,认为该成果“适应我国电子信息学科基础教学的需要,有较好的指导意义,达到了国内领先水平”,“对不同类型院校构建相关学科基础教学平台均有较好的参考价值”。

在此基础上,由我担任主编,筹建了“电子信息学科基础课程系列教材”编委会。编委会多次组织部分高校的教学名师、主讲教师和教育部高等学校教学指导委员会委员,进一步探讨和完善《电子信息学科基础教程 2004》研究成果,并组织编写了这套“电子信息学科基础课程系列教材”。

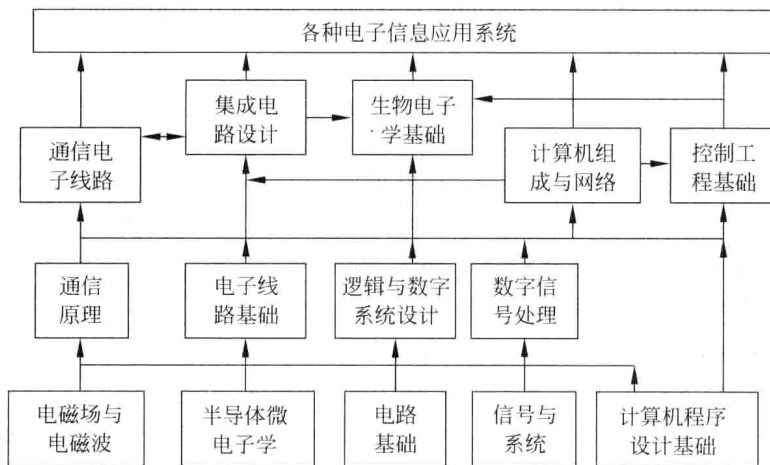
在教材的编写过程中,我们强调了“基础性、系统性、集成性、可行性”的编写原则,突出了以下特点:

- (1) 体现科学技术领域已经确立的新知识和新成果。
- (2) 学习国外先进教学经验,汇集国内最先进的教学成果。
- (3) 定位于国内重点院校,着重于理工结合。

(4) 建立在对教学计划和课程体系的研究基础之上,尽可能覆盖电子信息学科的全部基础。本丛书规划的 14 门课程,覆盖了电气信息类如下全部 7 个本科专业:

- 电子信息工程
- 通信工程
- 电子科学与技术
- 计算机科学与技术
- 自动化
- 电气工程与自动化
- 生物医学工程

(5) 课程体系整体设计,各课程知识点合理划分,前后衔接,避免各课程内容之间交叉重复,目标是使各门课程的知识点形成有机的整体,使学生能够在规定的课时数内,掌握必需的知识和技术。各课程之间的知识点关联如下图所示:



即力争将本科生的课程限定在有限的与精选的一套核心概念上,强调知识的广度。

(6) 以主教材为核心,配套出版习题解答、实验指导书、多媒体课件,提供全面的教学解决方案,实现多角度、多层面的人才培养模式。

(7) 由国内重点大学的精品课主讲教师、教学名师和教指委委员担任相关课程的设计和教材的编写,力争反映国内最先进的教改成果。

我国高等学校电子信息类专业的办学背景各不相同,教学和科研水平相差较大。本系列教材广泛听取了各方面的意见,汲取了国内优秀的教学成果,希望能为电子信息学科教学提供一份精心配备的搭配科学、营养全面的“套餐”,能为国内高等学校教学内容和课程体系的改革发挥积极的作用。

然而,对于高等院校如何培养出既具有扎实的基本功,又富有挑战精神和创造意识的社会栋梁,以满足科学技术发展和国家建设发展的需要,还有许多值得思考和探索的问题。比如,如何为学生营造一个宽松的学习氛围?如何引导学生主动学习,超越自己?如何为学生打下宽厚的知识基础和培养某一领域的研究能力?如何增加工程方法训练,将扎实的基础和宽广的领域才能转化为工程实践中的创造力?如何激发学生深入探索的勇气?这些都需要我们教育工作者进行更深入的研究。

提高教学质量,深化教学改革,始终是高等学校的工作重点,需要所有关心我国高等教育事业人士的热心支持。在此,谨向所有参与本系列教材建设工作的同仁致以衷心的感谢!

本套教材可能会存在一些不当甚至谬误之处,欢迎广大的使用者提出批评和意见,以促进教材的进一步完善。



2008年1月

本书第1版自2008年11月出版以来,在电子科技大学和国内其他许多高等院校用作主讲教材与参考书,获得了大量成功应用。被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材和国家精品课程教材。

第2版修订广泛吸取几年来诸多院校教师与学生们的反馈意见,并结合新的学术与教学研究,以适应当前通信理论的发展与教学需要。本次修订在保持原来的章节结构、组织特点与写作风格的基础上,力图在内容的先进与代表性、理论与实际应用的有机结合、简明易读与富有启发性方面进行优化。为了方便熟悉第1版的广大师生,下面对所作变动予以详细说明。

第1章:1.3节,更名为“消息与信源”。以具体的文字与语音消息开头,弱化抽象的信息描述方法。1.4节,改写“信道的影响”部分,突出信号衰减与加性噪声两个基本因素,补充传输带宽的概念。1.6节,简要说明基带与频带传输的概念。

第2章:对全章进行了结构调整与简化。2.1节,“分贝”小节更名为“功率单位与分贝”,围绕“dBm与dBW”进行说明;缩减了傅里叶变换的性质与常见变换对。2.2节,略去复随机信号、互功率谱。2.3节,将高斯信号与高斯白噪声合为一节,删去“常用函数”部分。2.5节,将带通信号、带通随机信号与噪声简化后合为一节。本章还分解与删除了原2.5节、2.6节与2.9节,将等效噪声带宽移入“信号通过LTI系统”节;匹配滤波器与PAM信号功率谱分析移到第4章相关小节中。

第3章:3.1节,梳理与简化SSB的讨论,增加混频的概念。3.2节,解释调频信号公式中积分运算的不同记法,简化正弦信号角度调制的频谱分析,简化窄带调频,梳理接收方法。3.4节,梳理内容与次序以方便教学取舍:先归纳重要结论,再阐述常用的预加重技术,而后具体分析噪声性能,最后说明改善门限效应的方法。3.5节,采用案例形式讨论几种技术及其运用方法,包括:①模拟电话中的FDM,②无线电AM广播中的超外接收机,③立体声FM无线广播中的FDM与兼容性设计,④模拟电视广播中的VSB。本章例题中增加了3.1节(AM广播常识)与3.4节(FM广播常识)。

第4章:4.2节,梳理内容与次序以方便教学取舍:首先利用基本公式讨论矩形PAM信号功率谱的主要结论,而后说明信号的数据率与带宽,最后详细推导有关公式。4.3节,插入匹配滤波器小节,解释误码分析中的优化设计思路,充实最佳接收机的分析,最后将一般接收系统的讨论列作选修内容。4.4节,先讨论多元接收的基本方法、性能结论与格雷编码,而误码分析置于后面可作选修。4.5节,更名为“码间干扰与带限信道上的传输方法”,突出带限信道的无ISI传输问题与方法,阐明基带信号的最小理论带宽值,充实根升余弦滤波器的设计例子。

第5章：5.1节与5.2节，强调基于 E_b/N_0 形式的 BASK/BFSK 非相干解调性能公式（这种形式在研究中更为常用），略去关于功率谱的推导，采用通用形式的带宽表示（避免只用矩形 NRZ 特例）。5.3节，侧重 BPSK 最佳接收系统的性能结论，修改 DPSK 差分检测的分析过程。5.4节，侧重 QPSK 带格雷码的直接映射方法，改进例题，简化 DQPSK 讨论并补充差分接收框图。5.5节，插入无 ISI 传输内容，侧重最小带宽与最高频带利用率的讨论（将矩形 NRZ 与滚降升余弦作为两种常见信号情形）。5.6节，增加“多元数字频带调制”一节，包含 MASK、MFSK、MPSK 与 QAM 方法，引入星座图的概念性，比较两类调制的特点。

第6章：梳理 DPCM 编码的分析并简要介绍其在视频编码的应用，简述 $\Sigma-\Delta$ 调制的概念。

第7章：配合新增的 5.6 节，将原 MASK、MPSK 与 QAM 三节简化后合并为一节，并对 MFSK 节进行简化。

第8章：全章重新编著。8.1节，梳理内容并充实 MSK 信号的 OQFSK 等效形式的详细推导。8.2节，阐述并行/多音的思想，说明 IFFT 实现方法，简要介绍 WLAN 与 ADSL 两个重要案例。8.3节，由原 8.3 节与 8.4 节合并梳理为“扩展频谱技术与 CDMA”一节，充实抗窄带干扰特性，阐述码分多址原理，梳理伪随机序列相关内容，充实跳频技术，简要介绍 CDMA、GPS 与蓝牙三个重要案例。

第9章：裁剪关于 FDM 模拟电话系统与 CDMA 蜂窝电话系统的介绍（它们已经移到前面章节）。

第10、11章：修正几处笔误。

最后，充实各章的例题与习题。增加附录 C—— $Q(x)$ 函数表。

本次修订由李晓峰教授统编定稿。

本书的出版，得到电子科技大学“通信原理”课程组同仁们的帮助，以及学校教务处和众多师生的大力支持。教材的使用过程中，许多院校的教师和学生提出了宝贵的意见。清华大学出版社的文怡编辑等花费了不少精力，作者在此一并表示衷心感谢。

书中不当之处在所难免，敬请批评指正。

作 者

2014 年 5 月

交流是人类社会的基本活动,交通系统实现了物质与人员的交流,通信系统实现了信息的交流。这两个重要的系统,对人类社会的进步与文明的发展起着巨大的作用。21 世纪的信息社会以广泛开发与运用电子通信系统为重要特征,《通信原理》阐述通信系统的基础理论、技术与分析方法,它是现代信息社会中许多专业技术人员所需的基础知识。

作者结合多年来从事通信与信息学科的科学研究与技术开发的经验,以及讲授这门课程的教学实践经验,在广泛参考了国内外现有的同类书籍基础上,编写了这本本科生教材。编写中,本教材力求突出下面几点:

(1) 通信理论与技术发展迅速,作为教科书要选择具有基础性与代表性的内容,注重揭示各个概念的来源、问题的提出与解决方法,引导学生领悟其中的思想,达到融会贯通、举一反三的目的。

(2) 强调理论与实际的结合,注意阐述各种技术方法的数学原理,解释数学概念所关联的物理含义。

(3) 注重内容与表述方式的简明性、系统性与可读性。书中配置了大量的图示与例题,帮助阅读理解。在叙述上重点突出、层次分明,并采用“*”标志和不同字体来区分选读内容。

全书共分 11 章:

第 1 章——绪论,介绍通信及其系统的基础概念与入门知识;

第 2 章——基础知识,介绍信号、随机信号及线性系统的基本知识,着重关注它们在通信方面的内容;

第 3 章——模拟传输,介绍各种重要的模拟调制技术,包括幅度调制(常规 AM、DSB-SC、SSB 与 VSB)与角度调制(FM 与 PM)方式,说明它们的信号产生与接收方法、功率谱与带宽、噪声性能等,并介绍几个典型应用实例;

第 4 章——数字基带传输,介绍传输数字序列时基带信号的形成、功率谱与带宽等基本问题,说明噪声中的传输、无码间干扰、符号定时与同步,以及线路码型等问题;

第 5 章——基本的数字频带传输,介绍各种基本的数字频带调制技术,包括 2ASK、2FSK、2PSK、QPSK 及其差分调制等,说明它们的信号产生与接收方法、功率谱与带宽、误码分析方法,并比较各种系统的特性;

第 6 章——模拟信号数字化与 PCM,介绍模拟信号数字化中的抽样、量化与编码技术,解释脉冲编码及其相关技术,简要说明时分复用与有关的数字体系;

第7章——信号空间分析与多元数字传输,介绍信号空间、信号星座图、最佳接收准则、最佳接收机结构与差错概率,并运用它们讨论 MASK、MPSK、MQAM 与 MFSK 技术;

第8章——现代数字传输技术,介绍几种现代数字传输中的常见技术,包括具有最小频移间隔的 MSK、采用多个并行载波的 OFDM、伪随机序列的特性,以及扩展频谱的通信技术;

第9章——多用户与无线通信,介绍解决众多用户共享通信系统资源的多路复用与多址技术,说明无线系统设计中的链路预算分析,并简单介绍无线信道的多径衰落特征与分集接收技术;

第10章——信息论基础,介绍熵、相对熵与互信息的基本概念,解释信道的容量与信道编码定理,说明无失真信源编码定理、速率-失真关系等;

第11章——纠错编码,介绍编码信息传输的基本概念、纠错编码与译码的基本原理、线性分组码、循环码与二元卷积码等。

书中列举了大量的例题与图示,各章末附有充足的习题供练习。

本教材以高等数学、初等概率论、信号与系统的基本知识为基础,可以作为高等学校通信工程、信息工程等电子信息类专业的本科生的教材或教学参考书。为了适应不同学校教学与广大读者自学的需要,本书的内容大致分为两部分:第一部分为基本内容,包括第1~6章;第二部分为提高内容,包括第7~11章。为了尽量突出层次,书中对于一些可选的节或小节标注了“*”;还特意将繁琐的计算、数学证明等相对独立的段落采用楷体排版,读者阅读时可以视情况跳过这些内容,而不影响对整体内容的理解。本书建议了两种教学方案(参见图示):

(1) 作为一个学期课程的基本教学方案:建议教学学时数 48~64 学时;

(2) 作为两学期课程的完整教学方案:建议教学学时数 72~96 学时。

还可以在此基础上灵活调整,比如:①第2章的基础知识可以分散,结合具体章节讲授;②只关心数字通信时,第3章可以略去;③第8章中可以选择部分节讲授;④第11章的纠错编码可以留给专门课程讲授;⑤选择性地跳过各处标有“*”的节与楷体排版的可选内容。

基本教学方案(48~64 学时)

第1章 绪论
第2章 基础知识
第3章* 模拟传输
第4章 数字基带传输
第5章 基本的数字频带传输
第6章 模拟信号数字化与 PCM
第7章* 信号空间分析与多元数字传输
第8章* 现代数字传输技术(部分节)

完整教学方案(72~96 学时)

第1~6章
第7章 (也可以放在上一学期)
第8章 现代数字传输技术
第9章 多用户与无线通信
第10章 信息论基础
第11章* 纠错编码

本书由李晓峰教授主编,经肖先赐教授主审。各章执笔分别是:李晓峰编写了第1,4,5,7和10章,周宁编写了第3章,邵怀宗编写了第8章,朱立东编写了第9章,周亮编写了第11章,周宁与李晓峰合作编写了第2,6章。全书由李晓峰统稿。

本书的编写得到了电子科技大学通信原理课程组同仁与学生们的鼓励、帮助和支持,李乐民院士、李在铭教授、国家教学名师彭启琮教授对本书给予了指导并提出了许多宝贵的意见,研究生任宏、范方豪、王娟、胡在洲、蒋晓燕和罗曦为本书的打印、整理和校对做了许多工作,本书的出版得到了清华大学出版社的大力支持,王一玲、陈志辉编辑花费了不少精力,作者在此对上述人士一并表示衷心的感谢。

限于作者水平,书中谬误与疏漏在所难免,敬请批评指正。

作 者

于成都 电子科技大学

2008年9月

第 1 章 绪论	1
1.1 通信的基本概念	2
1.2 历史回顾	4
1.3 消息与信源	6
1.3.1 数字信源与模拟信源	6
1.3.2 随机信号与确定信号	9
1.3.3 信息及其度量	10
1.3.4 常见的消息类型	12
1.4 信道	14
1.4.1 信道的影响	14
1.4.2 加性噪声信道模型	15
1.4.3 常用信道	16
1.5 频带与电波传播	18
1.5.1 频带的名称	19
1.5.2 无线电波的传播	19
1.5.3 无线频谱及其管理	22
1.5.4 频分复用	22
1.6 数字与模拟通信系统	23
1.6.1 模拟通信系统	23
1.6.2 数字通信系统	25
1.6.3 通信系统的基本性能指标	27
1.6.4 信道的容量	27
1.7 通信网络	28
本章关键词	29
习题	30
第 2 章 基础知识	31
2.1 确知信号	32
2.1.1 信号及其基本参数	32
2.1.2 傅里叶变换与信号的频谱密度	34
2.1.3 能量谱密度与功率谱密度	35
2.1.4 信号的频带与带宽	37

目录

2.2 随机信号	38
2.2.1 概念与定义	38
2.2.2 基本特性	39
2.2.3 平稳随机过程	40
2.2.4 两个信号的联合特性	41
2.2.5 功率谱密度	42
2.3 高斯信号与高斯白噪声	43
2.3.1 高斯分布与高斯信号	43
2.3.2 白噪声	44
2.3.3 高斯白噪声	46
2.4 信号通过线性时不变系统	46
2.4.1 确知信号通过系统	46
2.4.2 无失真传输条件	47
2.4.3 平稳随机信号通过系统	47
*2.4.4 系统的等效噪声带宽	49
2.5 带通信号	50
2.5.1 希尔伯特变换与解析信号	50
2.5.2 带通信号及其复包络	51
*2.5.3 频谱搬移	52
*2.5.4 带通系统	53
2.5.5 带通高斯白噪声	54
本章关键词	57
习题	57
第3章 模拟传输	60
3.1 幅度调制	61
3.1.1 常规调幅(AM)	61
3.1.2 抑制载波双边带调幅(DSB-SC)	65
3.1.3 单边带调幅(SSB)	66
3.1.4 残留边带调幅(VSB)	70
3.2 模拟角度调制	71
3.2.1 角调制的基本概念	71

3.2.2	角度调制信号的频谱特性	73
*3.2.3	窄带角度调制	76
3.2.4	调角信号的产生	76
3.2.5	调角信号的接收	77
3.3	幅度调制系统的抗噪声性能	79
3.3.1	模拟传输中的噪声问题	79
3.3.2	常规 AM 系统(非相干解调)	81
3.3.3	DSB-SC 与 AM(相干解调)系统	82
*3.3.4	SSB 系统	83
3.4	角度调制系统的抗噪声性能	84
3.4.1	FM 与 PM 系统的抗噪声性能	84
*3.4.2	预加重/去加重技术	86
*3.4.3	角度调制系统的噪声性能分析	87
*3.4.4	改善门限效应的解调方法	90
3.5	各类通信系统的比较与应用	92
3.5.1	各类通信系统的比较	92
3.5.2	频分多路复用	94
*3.5.3	模拟调制应用举例	95
本章关键词	100
习题	101
第 4 章	数字基带传输	106
4.1	二元与多元数字基带信号	107
4.1.1	数据传输的基本概念	107
4.1.2	二元与多元 PAM 信号	110
4.1.3	数字基带信号的传输速率	112
4.2	数字基带信号的功率谱与带宽	113
4.2.1	信号的功率谱	113
4.2.2	信号的带宽	115
*4.2.3	一般 PAM 信号功率谱公式及推导	115
4.3	二元信号的接收方法与误码分析	118
4.3.1	噪声中二元信号的接收方法	118
4.3.2	接收系统的误码性能	120

目录

4.3.3	匹配滤波器	122
*4.3.4	误码过程的分析	124
*4.3.5	一般接收系统的误码率计算	128
*4.4	多元信号的接收方法与误码分析	129
4.4.1	接收方法与误码性能	130
4.4.2	误比特率	130
4.4.3	格雷编码	131
4.4.4	误码分析	132
4.5	码间串扰与带限信道上的传输方法	134
4.5.1	码间串扰问题	135
4.5.2	无码间串扰传输与 Nyquist 准则	136
4.5.3	带限信道上的无码间串扰传输	138
4.5.4	升余弦滚降滤波器	139
*4.5.5	带限 AWGN 信道上的最佳传输系统	141
4.5.6	眼图	142
*4.6	信道均衡	144
4.6.1	均衡原理	144
4.6.2	数字均衡器	145
4.6.3	基本均衡算法	146
4.6.4	自适应均衡算法	148
*4.7	部分响应系统	148
4.7.1	第 I 类部分响应系统(又名双二进制系统)	149
4.7.2	第 IV 类部分响应系统(又名改进双二进制系统)	152
4.7.3	部分响应系统的一般形式	153
4.8	符号同步	154
4.8.1	基本概念	154
4.8.2	非线性滤波同步法——开环自同步法	156
4.8.3	早迟门同步法——闭环自同步法	158
4.9	线路码型	159
4.9.1	基本线路码型	160
*4.9.2	HDB3 码及其他	163
	本章关键词	164
	习题	165

第 5 章	基本的数字频带传输	170
5.1	BASK	172
5.1.1	基本原理	172
5.1.2	功率谱与带宽	174
*5.1.3	包络检波的误码性能分析	174
5.2	BFSK	176
5.2.1	基本原理	176
5.2.2	功率谱与带宽	179
*5.2.3	包络检波法的误码性能分析	180
5.3	BPSK 与 DPSK	181
5.3.1	2PSK	181
5.3.2	2DPSK	184
*5.3.3	载波同步	188
5.4	QPSK 与 DQPSK	189
5.4.1	QPSK 信号的基本原理	189
5.4.2	QPSK 的调制解调方法及误比特性能	192
*5.4.3	DQPSK	194
*5.4.4	OQPSK 与 $\frac{\pi}{4}$ DQPSK	195
5.5	基本频带调制的讨论	196
5.5.1	ASK 与 FSK 的相干解调	197
5.5.2	无码间串扰传输	197
5.5.3	差错概率的比较	199
5.5.4	功率谱与带宽的讨论	200
*5.6	多元数字频带调制	201
5.6.1	MASK	202
5.6.2	MFSK	202
5.6.3	MPSK	204
5.6.4	QAM	205
5.6.5	信号功率谱与带宽	206
5.6.6	误码性能与比较	207
*5.7	复包络与等效基带系统	208