

国外电子与通信教材系列

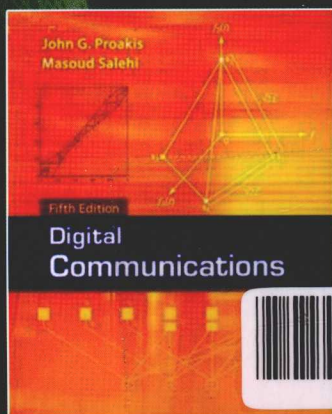
权威作者经典力作

Mc
Graw
Hill Education

数字通信

(第五版·中文精简版)

Digital Communications
Fifth Edition



[美] John G. Proakis 著
Masoud Salehi
张力军 等改编



 电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

数字通信

(第五版·中文精简版)

Digital Communications (Fifth Edition)

[美] John G. Proakis Masoud Salehi 著

张力军 等改编



YZLI0890146668

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是在《数字通信（第五版）》的基础上，根据国内的实际教学情况进行精简和改编的。主要的精简原则为：保留信号传输理论内容，舍去信息传输理论内容，并以传统而经典的数字传输理论为主，无线通信为辅。改编的部分主要是根据国内实际教学的常用习惯来进行的。精简后的内容主要涵盖：确定与随机信号分析，数字调制方法，AWGN 信道的最佳接收机，载波和符号同步，通过带限信道的数字通信，自适应均衡，多信道和多载波系统，数字通信用扩频信号，衰落信道：信道特征与信号传输，多天线系统。

本书取材新颖，讨论问题系统全面、逐步深入、概念清晰，理论分析严谨、逻辑性强，习题丰富，适合作为信息和通信专业高年级本科生和研究生的教材，也可作为相关专业的教师和科技工作者的参考书。

John G. Proakis, Masoud Salehi
Digital Communications, Fifth Edition
ISBN 978-0-07-295716-7

Copyright © 2008 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

All Rights reserved. No part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including without limitation photocopying, recording, taping, or any database, information or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

This authorized Chinese abridgement is jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) and Publishing House of Electronics Industry. This edition is authorized for sale in China Mainland.

Copyright © 2011 by McGraw-Hill Education (Asia), a division of the Singapore Branch of The McGraw-Hill Companies, Inc. and Publishing House of Electronics Industry.

版权所有。未经出版人事先书面许可，对本出版物的任何部分不得以任何方式或途径复制或传播，包括但不限于复印、录制、录音，或通过任何数据库、信息或可检索的系统。

本授权中文简体字删减版由麦格劳-希尔（亚洲）教育出版公司和电子工业出版社合作出版。此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权©2011由麦格劳-希尔（亚洲）教育出版公司与电子工业出版社所有。

本书封面贴有McGraw-Hill公司防伪标签，无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号：01-2011-3676

图书在版编目（CIP）数据

数字通信：第5版/（美）普罗科斯（Proakis,J.G.），（美）萨利希（Salehi,M.）著；张力军等改编. —北京：电子工业出版社，2012.1

书名原文：Digital Communications

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-14926-9

I. ①数... II. ①普... ②萨... ③张... III. ①数字通信—高等学校—教材 IV. ①TN914.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 221900 号

责任编辑：田宏峰

印 刷：北京市顺义兴华印刷厂

装 订：三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1 092 1/16 印张：26.25 字数：665 千字

印 次：2012 年 1 月第 1 次印刷

印 数：6 000 册 定价：49.90 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888

序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老师 and 专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展中的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

出版说明

进入 21 世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入 WTO 后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在 2000 年至 2001 年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了 40 余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、南京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学、中山大学、哈尔滨工业大学、西南交通大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过与作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐	北京邮电大学校长、教授、博士生导师
	杨千里	总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事、博士生导师
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长 国务院学位委员会学科评议组成员
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会副主任委员 中国电子学会常务理事
	郑宝玉	南京邮电大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘彩	中国通信学会副理事长兼秘书长，教授级高工 信息产业部通信科技委副主任
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员
张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院院长	
范平志	西南交通大学教授、博士生导师、信息科学与技术学院院长	

前 言

John G. Proakis 和 Masoud Salehi 所著的《数字通信（第五版）》是著者多年教学和科研的总结，是一本比较全面、系统、深入论述数字通信理论的经典力作，在学术界有很大的影响，同时也是一本优秀的研究生教材，多年来，国内外许多高等院校普遍采用本书作为信息和通信专业的研究生教材。《数字通信（第五版）》有 16 章，共 800 多页/1100 多页（中译版/英文版），内容十分丰富。麦格劳-希尔（亚洲）教育出版公司和电子工业出版社考虑到国内高等院校相关专业教学实际情况和读者的需求，计划在《数字通信（第五版）》的基础上适当地改编出版本书的精简版，要求精简版的篇幅大约为完全版的一半，以更好地适应国内教学和读者的需求。

《数字通信（第五版）》的 16 个章节分别为：第 1 章为绪论；第 2 章为确定与随机信号分析；第 3 章为数字调制方法；第 4 章为 AWGN 信道的最佳接收机；第 5 章为载波和符号同步；第 6 章为信息论基础；第 7 章为线性分组码；第 8 章为基于网格和图形的编码；第 9 章为通过带限信道的数字通信；第 10 章为自适应均衡；第 11 章为多信道和多载波系统；第 12 章为数字通信用扩频信号；第 13 章为衰落信道 I：信道特征与信号传输；第 14 章为衰落信道 II：容量与编码；第 15 章为多天线系统；第 16 章为多用户通信。

由于精简的篇幅相当大，确定精简原则并制定一个周密的精简方案是非常重要的。为此，有必要先对《数字通信（第五版）》的结构和内容进行分析，全书的内容大致可分为三大部分：第一部分为数字传输理论（第 1、2、3、4、5、9、10 等章，约占全书篇幅 44%），主要内容是论述通信信号、数字调制、同步和自适应均衡等；第二部分为信息传输理论（第 6、7、8 章，约占全书篇幅 24%），主要论述信息论基础、信源编码和信道纠错编码等；第三部分为无线通信基础（第 11、12、13、14、15、16 等章，约占全书篇幅 32%），主要论述衰落信道、扩频、多载波、多天线、多用户通信等。这三部分内容不是截然分隔，而是相互交叉、紧密联系的完整的理论体系。例如，第一部分是传统的数字通信理论基础，当然也是无线通信的基础。第三部分在讨论无线通信的论题时，更多地应用了第二部分的信息论与编码、信道纠错编码的理论知识。

考虑精简的要求和实际的教学情况，并结合多年的教学经验，确定以下的精简原则：保留信号传输理论内容（上述第一和第三两个部分），舍去信息传输理论内容（上述第二部分），并以传统而经典的数字传输理论为主，无线通信为辅。第一部分基本完整地保留数字传输理论基础体系，主要精简其中比较深入的高级论题的内容。第二部分全部精简。第三部分无线通信基础除了精简与第二部分有关的内容外，其余均保留。

精简方案如下：

整章精简的有第 6、7、8、14、16 五章。主要鉴于以下的考虑：要求精简的幅度很大同时也不可能大幅度改写原著各章的内容，许多院校都开设了《信息论与编码》和《纠错编码》等课程，课时有限等。

整章保留的有第 3、5、11、13 四章。

部分精简的有第 1、2、4、9、10、12、15 七章。部分精简的内容主要基于以下的考虑：非基本教学内容或后续专业课有更深入的介绍，深入的高级论题，与信息论及编码有关的内

容，篇幅限制等。

在第2章中，除了精简部分小节内容外，还对2.1节（带通与低通信号的表示）和2.9节（带通和低通随机过程）的内容进行了改写。2.1节的名称改为“带通信号与系统的表示”，本节包含2.1.1节（带通信号的表示法）和2.1.2节（带通系统对带通信号的响应）。2.9节的名称改为“带通平稳随机过程”。

2.1节的改写方法主要参照《数字通信（第四版）》中4.1节（带通信号与系统的表示）。改写主要基于以下的考虑：

(1)《数字通信（第五版）》中2.1节介绍的傅里叶变换知识在先修课程“信号与系统”中已学过，可以省去。

(2)《数字通信（第五版）》中2.1节介绍的带通系统输出复包络有一 $1/2$ 系数[见式(2-1-30)]，这种表示方法不如《数字通信（第四版）》的表示方法[见式(4-1-36)]好，当然这与两版的带通系统的表示方法不同有关。根据教学经验，《数字通信（第四版）》的表示方法比较好，读者更容易理解、记忆并掌握带通信号与系统的等效低通分析方法及其相关的概念。其实，《数字通信（第四版）》的表示方法早在S.斯坦与J. J.琼斯著《现代通信原理》（科学出版社，1979年，英文原版S. Stein, J. J. Jones, Modern Communication Principles with Application to Digital Signaling, McGraw-Hill Inc., 1967年）中就已论述了。这已成为传统而经典的表示方法和习惯，被普遍采用。此外，还明确地给出了《数字通信（第四版）》已有的复互相关系数定义式。

2.9节的改写方法主要参照《数字通信（第四版）》中的4.1.4节（带通平稳随机过程的表示法）。这主要基于以下的考虑：该节主要论述窄带高斯噪声的数学表示和统计特性，这在国内许多本科通信原理教材和课程中都有详细的论述，并与《数字通信（第四版）》论述一致，是一种传统的经典论述方式。因此采用《数字通信（第四版）》的论述和表示方法对国内大多数读者比较熟悉也容易接受和掌握。

本书是在《数字通信（第五版）》（张力军、张宗橙、宋荣芳、曹士珂等译）的基础上进行改编的，参与改编的还有张宗橙、宋荣方、曹士柯、曹轩宇、张晓辉、杨文、张海江、张杰、马平、周国平、孟云飞、周克琴等。完全版的内容精简后，再进行整合，对章节、公式、图表等编号进行必要的调整，最终完成的精简版整体架构仍保持与完全版一致，共有11章，其中数字传输理论基础内容约占70%，无线通信基础内容约占30%。

本书由电子工业出版社和麦格劳-希尔（亚洲）教育出版公司委托张力军负责内容精选和改编，两家出版社为本书的出版和提高出版质量做出了很大的努力，在此表示诚挚的谢意。限于编译者的专业水平和教学经验，精简版难免有疏漏和不当之处，敬请读者不吝指正。

张力军
于南京邮电大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数字通信系统的基本组成部分	1
1.2 通信信道及其特征	2
1.3 通信信道的数学模型	6
1.4 数字通信发展的回顾与展望	7
第 2 章 确定与随机信号分析	10
2.1 带通信号与系统的表示	10
2.1.1 带通信号的表示法	10
2.1.2 带通系统对带通信号的响应	15
2.2 波形的信号空间表示	16
2.2.1 矢量空间概念	16
2.2.2 信号空间概念	18
2.2.3 信号的正交展开	18
2.2.4 格拉姆-施密特 (Gram-Schmidt) 过程	20
2.3 某些有用的随机变量	25
2.4 随机过程	38
2.4.1 广义平稳随机过程	38
2.4.2 循环平稳随机过程	40
2.5 随机过程的级数展开	41
2.5.1 带限随机过程的抽样定理	41
2.5.2 K-L (Karhunen-Loève) 展开式	42
2.6 带通平稳随机过程	44
习题	47
第 3 章 数字调制方法	55
3.1 数字调制信号的表示	55
3.2 无记忆调制方法	56
3.2.1 脉冲幅度调制 (PAM)	57
3.2.2 相位调制	59
3.2.3 正交幅度调制	61
3.2.4 多维信号传输	63
3.3 有记忆信号传输方式	68
3.3.1 连续相位频移键控 (CPFSK)	69
3.3.2 连续相位调制 (CPM)	70
3.4 数字调制信号的功率谱	78
3.4.1 有记忆数字调制信号的功率谱密度	79
3.4.2 线性调制信号的功率谱密度	80

3.4.3	有限记忆数字调制信号的功率谱密度	82
3.4.4	马尔可夫结构调制方式的功率谱密度	82
3.4.5	CPFSK 和 CPM 信号的功率谱密度	84
	习题	90
第 4 章	AWGN 信道的最佳接收机	99
4.1	波形与矢量信道的模型	99
4.1.1	一般矢量信道的最佳检测	100
4.2	波形与矢量 AWGN 信道	103
4.2.1	矢量 AWGN 信道的最佳检测	105
4.2.2	AWGN 信道最佳接收机的实现	110
4.2.3	最大似然检测错误概率的一致边界	114
4.3	带限信号传输的最佳检测和错误概率	117
4.3.1	ASK 或 PAM 信号传输的最佳检测和错误概率	118
4.3.2	PSK 信号传输方式的最佳检测和错误概率	119
4.3.3	QAM 信号传输的最佳检测和错误概率	122
4.3.4	解调与检测	125
4.4	功限信号传输的最佳检测和错误概率	127
4.4.1	正交信号传输的最佳检测和错误概率	127
4.4.2	双正交信号传输的最佳检测和错误概率	130
4.4.3	单纯信号传输的最佳检测和错误概率	131
4.5	不确定情况下的最佳检测: 非相干检测	131
4.5.1	载波调制信号的非相干检测	133
4.5.2	FSK 调制信号的最佳非相干检测	135
4.5.3	正交信号传输非相干检测的错误概率	135
4.5.4	相关二进制信号包络检测的错误概率	138
4.5.5	差分 PSK (DPSK)	139
4.6	数字信号传输方法的比较	142
4.6.1	带宽与维度	142
4.7	格和基于格的星座图	144
4.7.1	格的介绍	145
4.7.2	基于格的信号星座图	149
4.8	有记忆信号传输方式的检测	153
4.8.1	最大似然序列检测器	153
4.9	CPM 信号的最佳接收机	155
4.9.1	CPM 的最佳解调和检测	156
4.9.2	CPM 信号的性能	159
4.9.3	CPM 信号的次最佳解调和检测	163
	习题	164
第 5 章	载波和符号同步	180
5.1	信号参数估计	180

5.1.1	似然函数	181
5.1.2	信号解调中的载波恢复与符号同步	181
5.2	载波相位估计	183
5.2.1	最大似然载波相位估计	184
5.2.2	锁相环	186
5.2.3	加性噪声对相位估计的影响	187
5.2.4	面向判决环	189
5.2.5	非面向判决环	193
5.3	符号定时估计	198
5.3.1	最大似然定时估计	198
5.3.2	非面向判决定时估计	199
5.4	载波相位和符号定时的联合估计	202
5.5	最大似然估计器的性能特征	204
	习题	206
第 6 章	通过带限信道的数字通信	208
6.1	带限信道的特征	208
6.2	带限信道的信号设计	211
6.2.1	无符号间干扰的带限信号的设计——奈奎斯特准则	213
6.2.2	具有受控 ISI 的带限信号设计——部分响应信号	216
6.2.3	对受控 ISI 的数据检测	219
6.2.4	有失真信道的信号设计	223
6.3	有 ISI 和 AWGN 信道的最佳接收机	226
6.3.1	最佳最大似然接收机	226
6.3.2	具有 ISI 信道的离散时间模型	228
6.3.3	离散时间白噪声滤波器模型的维特比算法	230
6.4	线性均衡	232
6.4.1	峰值失真准则	233
6.4.2	均方误差 (MSE) 准则	237
6.4.3	MSE 均衡器的性能特征	240
6.4.4	分数间隔均衡器	242
6.4.5	基带和带通线性均衡器	246
6.5	判决反馈均衡器	247
6.5.1	系数最佳化	248
6.5.2	DFE 的性能特征	249
6.6	降低复杂性的 ML 检测器	251
	习题	253
第 7 章	自适应均衡	264
7.1	自适应线性均衡	264
7.1.1	迫零算法	264
7.1.2	LMS 算法	265

7.1.3	LMS 算法的收敛特性	268
7.1.4	由有噪梯度估计值引起的过剩 MSE	269
7.1.5	加速 LMS 算法的初始收敛速率	271
7.1.6	自适应分数间隔均衡器——抽头泄漏算法	273
7.1.7	用于 ML 序列检测的自适应信道估计器	274
7.2	自适应判决反馈均衡器	275
7.3	自适应均衡的递归最小二乘算法	276
7.3.1	递推最小二乘 (卡尔曼) 算法	277
7.3.2	线性预测和格型滤波器	280
	习题	284
第 8 章	多信道和多载波系统	287
8.1	在 AWGN 信道中的多信道数字通信	287
8.1.1	二进制信号	289
8.1.2	M 元正交信号	290
8.2	多载波通信	291
8.2.1	单载波和多载波调制	292
8.2.2	非理想线性滤波器信道的容量	292
8.2.3	正交频分复用 (OFDM)	293
8.2.4	OFDM 系统的调制和解调	294
8.2.5	OFDM 系统的 FFT 算法实现	296
8.2.6	多载波信号的谱特征	298
8.2.7	多载波调制中的比特和功率的分配	300
8.2.8	多载波调制中的峰均比	302
8.2.9	多载波调制中的信道编码的考虑	303
	习题	303
第 9 章	数字通信用扩频信号	305
9.1	扩频数字通信系统的模型	305
9.2	直接序列扩频信号	306
9.2.1	译码器的差错率性能	308
9.2.2	DS 扩频信号的一些应用	314
9.2.3	脉冲干扰对 DS 扩频系统的影响	318
9.2.4	DS 扩频系统中窄带干扰的删除	322
9.2.5	PN 序列的生成	327
9.3	跳频扩频信号	329
9.3.1	AWGN 信道中的 FH 扩频信号的性能	331
9.3.2	部分频带干扰下 FH 扩频信号的性能	332
9.3.3	基于 FH 扩频信号的 CDMA 系统	335
9.4	其他类型的扩频信号	336
	习题	337

第 10 章 衰落信道：信道特征与信号传输	340
10.1 多径衰落信道的特征	340
10.1.1 信道相关函数和功率谱	342
10.1.2 衰落信道的统计模型	346
10.2 信号特征对信道模型选择的影响	349
10.3 频率非选择性慢衰落信道	350
10.4 多径衰落信道的分集技术	353
10.4.1 二进制信号	353
10.4.2 多相信号	359
10.4.3 M 元正交信号	360
10.5 频率选择性慢衰落信道中的信号传输：RAKE 解调器	365
10.5.1 抽头延迟线信道模型	365
10.5.2 RAKE 解调器	366
10.5.3 RAKE 解调器的性能	368
10.5.4 符号间干扰信道的接收机结构	374
10.6 多载波调制 (OFDM)	375
10.6.1 多普勒扩展引起的 OFDM 系统性能的减损	376
10.6.2 OFDM 系统中 ICI 的抑制	379
习题	380
第 11 章 多天线系统	386
11.1 多天线系统的信道模型	386
11.1.1 慢衰落频率非选择性 MIMO 信道中的信号传输	387
11.1.2 MIMO 系统中数据符号检测	388
11.1.3 通过慢衰落频率选择性 MIMO 信道的信号传输	392
11.2 扩频信号与多码传输	396
11.2.1 正交扩频序列	397
11.2.2 复用增益与分集增益	399
11.2.3 多码 MIMO 系统	400
习题	403

第 1 章 绪 论

本书将介绍作为数字通信系统分析和设计基础的基本原理。数字通信的研究主题包括数字形式的信息从产生该信息的信源到一个或多个目的地的传输问题。在通信系统分析和设计中，特别重要的是信息传输所通过的物理信道的特征。信道的特征一般会影响通信系统基本组成部分的设计。下面将阐述通信系统的基本组成部分及其功能。

1.1 数字通信系统的基本组成部分

图 1-1-1 示出了一个数字通信系统的功能性框图和基本组成部分。信源输出可以是模拟信号，如音频或视频信号，或者数字信号，如计算机的输出，该信号在时间上是离散的并且具有有限个输出字符。在数字通信系统中，由信源产生的消息转换成二进制数字序列。理论上，应当用尽可能少的二进制数字表示信源输出（消息）。换句话说，就是要寻求一种信源输出的有效的表示方法，使其很少产生或不产生冗余。通常将模拟或数字信源的输出有效地转换成二进制数字序列的处理过程称为信源编码或数据压缩。

由信源编码器输出的二进制数字序列称为信息序列，它被传送到信道编码器。信道编码器的目的是在二进制信息序列中以受控的方式引入一些冗余，以便于在接收机中用来克服信号在信道中传输时所受到的噪声和干扰的影响。因此，所增加的冗余是用来提高接收数据的可靠性以及改善接收信号的逼真度的。实际上，信息序列中的冗余有助于接收机译出期望的信息序列。例如，二进制信息序列的一种（平凡的）形式的编码就是将每个二进制数字简单地重复 m 次，这里的 m 为一个正整数。更复杂的（不平凡的）编码涉及一次取 k 个信息比特并将每个 k 比特序列映射成唯一的 n 比特序列，该序列称为码字。以这种方式对数据编码所引入的冗余度的大小是由比率 n/k 来度量的。该比率的倒数，即 k/n ，称为码的速率，简称为码率。

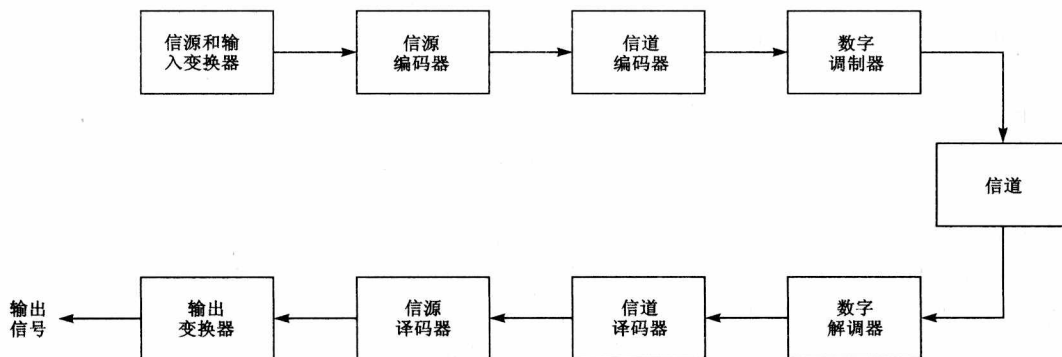


图 1-1-1 数字通信系统的基本组成部分

信道编码器输出的二进制序列送至数字调制器，它是通信信道的接口。因为在实际中所遇到的几乎所有的通信信道都能够传输电信号（波形），所以数字调制的主要目的是将二进制信息序列映射成信号波形。为了详细地说明这一点，假定已编码的信息序列以某个均匀速率 R

比特/秒一次传输一个比特，数字调制器可以简单地将二进制数字“0”映射成波形 $s_0(t)$ ，而二进制数字“1”映射成波形 $s_1(t)$ 。在这种方式中，信道编码器输出的每个比特是分别传输的。我们把它称为二进制调制。另一种方式为，调制器在一次可以传输 b 个已编码的信息比特，其方法是采用 $M = 2^b$ 个不同的波形 $s_i(t)$ ， $i=0, 1, 2, \dots, M$ ，每一个波形用来传输 2^b 个可能的 b 比特序列中的一个序列，这种方式称为 M 元调制 ($M>2$)。注意，每 b/R 秒就有一个新的 b 比特序列进入调制器。因此，当信道比特率 R 固定时，与一 b 比特序列相应的 M 个波形中之一波形的传输时间量是二进制调制系统时间周期的 b 倍。

通信信道是用来传输发送机的信号给接收机的物理媒质。在无线传输中，信道可以是大气（自由空间）。另一方面，电话信道通常使用各种各样的物理媒质，包括有线线路、光缆和无线（微波）等。无论用什么物理媒质来传输信息，其基本特点是发送信号随机地受到各种可能机理的恶化，例如由电子器件产生的加性热噪声、人为噪声（如汽车点火噪声）及大气噪声（如在雷暴雨时的闪电）。

在数字通信系统的接收端，数字解调器对受到信道恶化的发送波形进行处理，并将该波形还原成一个数的序列，该序列表示发送数据符号的估计值（二进制或 M 元）。这个数的序列被送至信道译码器，它根据信道编码器所用的关于码的知识及接收数据所含的冗余度来试图重构初始的信息序列。

度量解调器和译码器工作性能好坏的一个指标是译码序列中发生差错的频度。更为准确地说，在译码器输出端平均比特错误概率是解调器-译码器组合性能的一个度量。一般地，错误概率是下列各种因素的函数：码特征、用来在信道上传输信息的波形的类型、发送功率、信道的特征（即噪声的大小、干扰的性质等）以及解调和译码的方法。在后续的各章中，将详细讨论这些因素及其对性能的影响。

作为最后一步，当需要模拟输出时，信源译码器从信道译码器接收其输出序列，并根据所采用的信源编码方法的有关知识重构由信源发出的原始信号。由于信道译码的差错以及信源编码器可能引入的失真，在信源译码器输出端的信号只是原始信源输出的一个近似。在原始信号与重构信号之间的信号差或信号差的函数是数字通信系统引入失真的一种度量。

1.2 通信信道及其特征

正如在前面指出的，通信信道在发送机与接收机之间提供了连接。物理信道也许是携带电信号的一对明线；或是在已调光波束上携带信息的光纤；或是水下海洋信道，其中信息以声波形式传输；或是自由空间，携带信息的信号通过天线在空间辐射传输。可被表征为通信信道的其他媒质是数据存储媒质，例如磁带、磁盘和光盘。

信号通过任何信道传输中的一个共同的问题是加性噪声。一般地，加性噪声是由通信系统内部组成元器件引起的，例如电阻和固态器件，有时将这种噪声称为热噪声。其他噪声和干扰源也许是系统外面引起的，例如来自信道上其他用户的干扰。当这样的噪声和干扰与期望信号占有同样频带时，可通过对发送信号和接收机中解调器的适当设计来使它们的影响最小。信号在信道上传输时可能会遇到的其他类型损伤有信号衰减、幅度和相位失真、多径失真等。

可以通过增加发送信号功率的方法来使噪声的影响最小。然而，设备和其他实际因素限制了发送信号的功率电平。另一个基本的限制是可用的信道带宽。带宽的限制通常是由于媒质以及发送机和接收机中组成器件和部件的物理限制产生的。这两种限制因素限制了在任何通

信信道上能可靠传输的数据量，我们将在以后各章中讲述这种情况。下面描述几种通信信道的重要特征。

1. 有线信道

电话网络扩大了有线线路的应用，如语音信号传输以及数据和视频传输。双绞线和同轴电缆是基本的导向电磁信道，它能提供比较适度的带宽。通常用来连接用户和中心机房的电话线的带宽为几百千赫（kHz）。另一方面，同轴电缆的可用带宽是几兆赫（MHz）。图 1-2-1 示出了导向电磁信道的频率范围，其中包含波导和光纤。

信号在这样信道上传输时，其幅度和相位都会发生失真，还会受到加性噪声的恶化。双绞线信道还易受到来自物理邻近信道的串音干扰。因为有线信道上的通信在我们日常通信中占有相当大的百分比，因此，人们对传输特性的表征以及对信号传输时的幅度和相位失真的减缓方法做了大量的研究。在第 6 章中，我们将阐述最佳传输信号及其解调的设计方法，在第 7 章中我们将研究信道均衡器的设计，它是用来补偿信道的幅度和相位失真的。

2. 光纤信道

光纤提供的信道带宽比同轴电缆信道大几个数量级。在过去的 20 年中，已经研发出具有较低信号衰减的光缆，以及用于信号和信号检测的高可靠性光子器件。这些技术上的进展导致了光纤信道应用的快速发展，不仅应用于国内通信系统中，而且也应用于跨大西洋和跨太平洋的通信中。由于光纤信道具有大的可用带宽，因此有可能使电话公司为用户提供一个宽系列电话业务，包括语音、数据、传真和视频等。

在光纤通信系统中，发送机或调制器是一个光源，可以是发光二极管（LED）或者激光。通过消息信号改变（调制）光源的强度来发送信息。光像光波一样通过光纤传播，并沿着传输路径被周期性地放大以补偿信号衰减（在数字传输情况中，光由中继器检测和再生）。在接收机中，光的强度由光电二极管检测，它的输出电信号的变化直接与照射到光电二极管上的光功率成正比。在光纤信道中的噪声源是光电二极管和电子放大器。

3. 无线电磁信道

在无线通信系统中，电磁能是通过作为辐射器的天线耦合到传播媒质的。天线的物理尺寸和配置主要决定于运行的频率。为了获得有效的电磁能量的辐射，天线必须比波长的 1/10 更长。因此，在调幅（AM）频段发射的无线电台，比如说在 $f_c = 1 \text{ MHz}$ （相当于波长 $\lambda = C / f_c = 300 \text{ m}$ ），要求天线至少为 30 m。

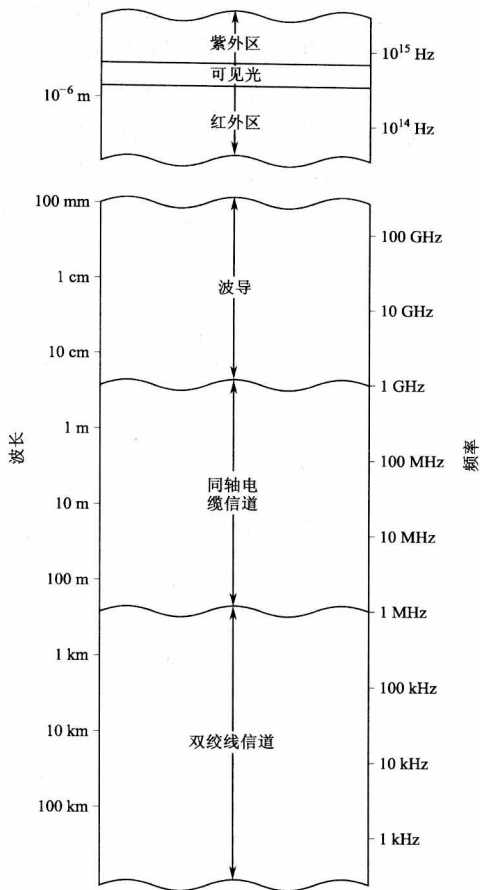


图 1-2-1 导向有线信道的频率范围

图 1-2-2 示出了不同频段的电磁频谱。在大气和在自由空间中电磁波传播的模式可以划分为三种类型，即地波传播、天波传播和视线传播 (LOS)。在甚低频 (VLF) 和音频段，其波长超过 10 km，地球和电离层对电磁波传播的作用如同波导。在这些频段，通信信号实际上环绕地球传播。由于这个原因，这些频段主要用来在世界范围内提供从海岸到船舶的导航帮助。在此频段中可用的带宽较小 (通常是中心频率的 1%~10%)，因此通过这些信道传输的信息速率较低，且一般限于数字传输。在这些频率上，最主要的一种噪声是由地球上雷暴活动产生的，特别是在热带地区。干扰是来自这些频段的用户。

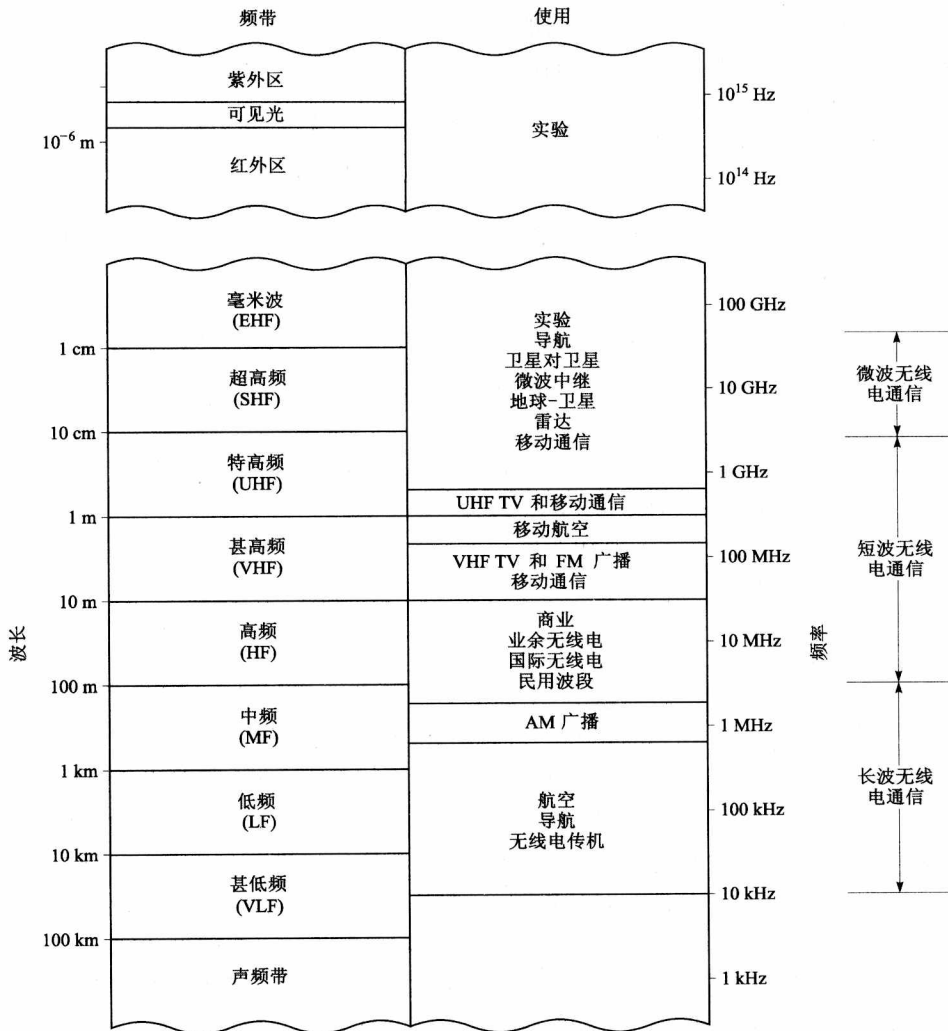


图 1-2-2 无线电通信信道的频率范围

如图 1-2-3 所示，地波传播是中频 (MF) 频段 (0.3~3 MHz) 最主要的传播模式，该频段用于 AM 广播和海岸无线电广播。在 AM 广播中，甚至大功率的地波传播范围限于 150 km 左右。在 MF 频段中，大气噪声、人为噪声和接收机的电子器件的热噪声是对信号传输的最主要的干扰。