

国外电子与通信教材系列

英文版

# 现代数字 与模拟通信系统 (第四版)

[美] B. P. 拉兹 著  
丁 峙



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

# 现代数字与模拟通信系统

(第四版)

(英文版)

[美] B. P. 拉兹 著  
丁 峙

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是电子工程领域中的理想的通信系统入门教材。作者首先介绍了信号与系统的基础理论和通信的核心问题,然后给出了设计和分析数字通信系统的工具。内容涵盖基本的通信理论、必要的数学基础及扩频通信等现代通信技术。启发性的讲解方法、精心挑选的例题和更新的MATLAB练习使本书成为易于被学生理解和接受的通信系统理论与应用的入门教材。本书不要求读者已具备概率论和随机信号等方面的基础知识。

本书涵盖通信原理、数字通信、扩频通信等相关领域的内容。可作为高等院校通信与电子系统方面的高年级本科生或研究生的双语教材或参考书,亦可作为通信系统方面的研发人员的入门参考书。

Copyright ©2009 by Oxford University Press, Inc.

MODERN DIGITAL AND ANALOG COMMUNICATION SYSTEMS, FOURTH EDITION was originally published by arrangement with Oxford University Press for sale/distribution in The Mainland (part) of the People's Republic of China (excluding the territories of Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan) only and not for export therefrom.

本书英文影印版专有出版权由 Oxford University Press, Inc., U.S.A. 授予电子工业出版社出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制和抄袭本书的任何部分。

本书在中国大陆地区生产, 仅限在中国大陆发行。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2010-4327

### 图书在版编目(CIP)数据

现代数字与模拟通信系统 = Modern Digital and Analog Communication Systems: 第4版: 英文 / (美) 拉兹 (Lathi, B. P.), (美) 丁峙 (Ding, Z.) 著. - 北京: 电子工业出版社, 2011.1

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-11955-2

I. ①现... II. ①拉... ②丁... III. ①数字通信系统-高等学校-教材-英文 ②模拟通信-通信系统-高等学校-教材-英文 IV. TN914

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第194861号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 马 岚

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 × 1092 1/16 印张: 63.75 字数: 2122千字

印 次: 2011年1月第1次印刷

定 价: 99.00元

凡所购买电子工业出版社的图书有缺损问题, 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 zlt@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和自由组合使用。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 清华大学深圳研究生院副院长
	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 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会副主任委员
	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
	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

本书第四版的主要目的是对第三版出版之后十余年内我们所目睹的通信系统领域内的大量技术进步做出回应。同时，新的软件和教学工具的出现使得为学生提供直观有效的例子及实验机会变得更加方便。结合通信领域近年来产生的技术进展，新版中做了大量改动。为了吸引学生的注意力并用通信工具把所学内容更好地与日常生活经验联系起来，我们将提供包括蜂窝系统、无线局域网（LAN）以及有线（数字用户环路，DSL）互联网服务等通信系统的工作原理和特性的相关知识。

## 主要的修改

本书的一些重要修改是基于强调对我们日常生活中日益普及的数字通信系统基础知识的需要。特别是，由于扩频、正交频分复用（OFDM）等新技术在应用上的普及，本书新增两章，其中第12章介绍扩频通信技术，第13章介绍频率选择性信道和OFDM系统。作为该类系统的应用例子，本书提供了当前无线通信标准的基础性介绍，包括蜂窝系统和采用IEEE802.11 a/b/g/n协议的无线局域网，此外对DSL调制解调技术及服务的最新进展也进行了说明。在原理层面，由于一些新进展，关于信息论和编码理论也有所变化，本书包含了开始彰显广泛商业应用前景的多入多出（multiple input multiple output, MIMO）技术的基本原理的讲述。我们还涵盖了纠错编码理论中的一些重要进展，包括软件解码、Turbo编码和低密度奇偶校验码（low-density parity check, LDPC）。

为了加强学习体验并为学生提供基于计算机的实验练习，一些章节也提供了有关的MATLAB例子和简单练习，以强化知识的掌握。

## 本书的组织

关于本书的组织，第四版教材首先给出了对信号与系统课程基础的回顾，之后讨论通信系统的核心主题，如模拟调制和数字编码调制。然后，给出了概率论和随机过程的基本工具，这些工具将要在教材的其他部分进行数字通信系统的设计和分析时用到。在数字通信系统的基础阐述完毕之后，最后两章概述了信息论和前向纠错编码基础。

理想情况下，与本书密切相关的内容应该在两门课程里进行讲授：一门是通信系统的基本原理，一门是在噪声和其他失真条件下的现代通信系统分析。前者主要依赖于确定的分析工具，例如傅里叶级数、傅里叶变换和采样定理，而后者依赖概率论和随机过程的工具来处理无法预测的信息和噪声。然而在现在的学术环境下，相互竞争的课程很多，很难将两门关于通信的基础性课程压缩到一门典型的电气工程的课程中。一些大学要求预先修完一门讲述概率论和随机过程知识的课程。这种情况下，可以将这两方面内容在一学期内讲授完毕。这本教材可以同时适应这两种情况：既可以用来作为一门一学期讲授的课程，重点讲述通信系统中关于确定性的内容，对噪声和干扰的效应只有很少的涉及；也可以同时讲授通信系统中确定性和随机性两方面内容。本书内容是独立自洽的，因为它提供了所有必须的概率论和随机过程背景知识。但如前所述，如果想要在一学期之内同时讲述通信系统的确定性和不确定性方面的知识，就要求学生有良好的概率论方面的背景知识。

第1章对通信系统做了全景性的介绍。定性地解释了通信理论的重要概念。这些内容能够吸引学生关注通信方面的题目，并推动学生学习第2章和第3章中介绍的信号分析工具，帮助他们将信号理解为矢量，并将傅里叶变换域看成用信号矢量分量来表示信号的一种方式。第4章和第5章分别讨论幅度（线性）调制和角度（非线性）调制。很多教师觉得在这个数字化的时代，调制技术应该尽量少做介绍，但是我们认为调制技术不仅是通信领域中一个基础的信号处理工具，它还会在通信领域（包括模拟和数字通信）和电气工程中的其他领域得到长久的应用，因此忽略调制技术很可能是短视的。第6章作为模拟与数字通信的纽带，介绍模数转换技术。这里详细讲述了采样、脉冲编码调制（包括DPCM）、增量调制、语音编码（vocoder）、图像/视频编码和压缩。第7章讨论数字调制的原理和技术。本章介绍了信道失真的概念，并提出一种补偿信道失真的有效手段——均衡技术。

第8章和第9章给出了概率论和随机过程的关键背景知识，这些知识组成了学习通信系统的第二套工具。这里尽可能提供了一些解决通信问题的实际应用例子，以激发学生的学习热情，提高学习兴趣。第10章和第11章给出了存在噪声时，模拟和数字通信系统的分析。数字通信中的最优信号检测在第11章中也有较透彻的阐述。第12章集中说明扩频技术。第13章给出了多种用来克服信道失真的实用技术，如信道均衡技术和广泛应用的OFDM技术。第14章对信息论进行了概述。最后在第15章说明差错控制编码的原理和应用。

编写本书的目的之一是通过清晰易懂并且有逻辑、有组织的方式讲授知识，使学习变得愉悦，或至少不再令学生望而生畏。所有的努力都是为了传达对知识较为深刻的洞察（而不仅仅是理解），并且在可能的情况下都对理论结果进行启发式的解读，并举出了大量的例子为抽象的结果给出进一步的澄清。对这个既定目标，即使只是部分的成功，也使我们所付出的努力有所回报。

## 新世界

1998年第三版出版后，已经出现了大量的技术进步。首先，蜂窝网络已经深入了城市和农村地区，包括几乎所有的发达和发展中国家。1998年，只有很少的在校学生有寻呼机或蜂窝电话，而现在几乎所有大学生都持有手机。第二，1998年几乎所有室内因特网接入都是通过低速（大约28.8 kbps）语音调制解调器。现今，大部分学生通过高速DSL或者电缆服务接入网络空间。另外，无线局域网使得那些艰深的术语例如IEEE 802.11进入了日常生活中。大部分在校学生都或多或少使用过这些技术。

大量的技术进步产生了新一代的学生，他们对学习新的技术及其应用有浓厚的兴趣。这些学生急切地想要了解在哪里、怎样才能在未来做出自己的贡献，而这种热切的愿望应该得到鼓励并加以利用。这本教材既能帮助教师讲授相关的题目，也可以帮助他们为学生提供阅读材料，帮助学生了解相关的知识。新版通过强调课程的数字部分并结合现在被广泛了解的无线及有线数字技术来达成这些目标。

## 课时选择

在总共超过50年的教学经验中，我们曾在几个大学的四分之一学年和半学年的教学体系中讲授通信课程。另一方面，学生对通信系统的个人经验也在不断增加，从上世纪60年代的简单无线电设备到21世纪能够方便地利用无线局域网、蜂窝网、卫星通信和家庭因特网接入。因此，越来越多的学生有兴趣学习这些熟悉的电子器件的工作原理。为了满足这些要求，根据以往的经验，我们修订出版了本教材的第四版，这个版本能够适应几种不同的授课模式。但是，在所有的授课模式中，模拟和数字通信的基础都应当进行讲授（即第1章至第7章的内容）。



## 一学期课程（没有概率论方面知识背景）

在很多现有课程中，本科学生直到学习通信理论时才会开始接触简单的概率工具。这种情况经常是因为学生被要求学习一门与工程科学无关的介绍性的统计课程。本课程非常适合有这类背景的学生。前七章为普通的电子与计算机工程专业本科生全面讲解了现代数字和模拟通信系统的知识。这样一门课可以在一个学期（40~45个学时）内完成，前提是所有的学生在预备课程“信号与系统”中较好地掌握了傅里叶分析的知识。这样前三章的大部分可以作为复习，在一周内结束。该学期的其他时间全部用来讲授第4章至第7章，以及第12章和第13章实际系统的一部分，来增强学生的学习兴趣。

## 一学期课程（有较好的概率论背景）

对于已经强化过概率论背景知识的情况，一学期的教学可以覆盖更多的数字通信的内容。在信号与系统分析的基础上应讲授一门严格的概率论课程（参阅 Cooper 和 McGillen 所著的 *Probabilistic Methods of Signal and System Analysis*，由牛津大学出版社于1999年出版，ISBN: 0195123549）。这样，除了第1章至第7章以外，第11章和第13章中关于均衡的部分也可以在一学期内讲授（假设学生有坚实的概率论背景知识，可以用几个小时就讲完第8章和第9章）。完成这种课程的学生就已经做好了进入电信行业或继续研究生课程的准备。

## 两学期课程（没有单独开设概率论课程）

本书所有内容可以在两学期内完全讲完，即使没有任何随机理论的准备课程。换言之，这种方式可以把通信系统和基础的随机方面的知识放在一起讲授。现在ECE课程中包含如此多的竞争课程，很难用两学期的课程仅仅讲授通信知识。另一方面，很多大学都由非工程背景的老师讲授概率论课程。这种情况下，将概率论融入这种两学期的通信课程中会比较适合。这样，在两学期课程中，可以如下安排教学时间：

第一学期：第1章至第7章（信号和通信系统）

第二学期：第8章至第13章（现代数字通信系统）

## 四分之一学年课程（有较强的概率论知识背景）

在四分之一学年的教学体系中，学生必须已经接触过概率论和统计方法，而且掌握得很好。他们也要掌握较好的傅里叶分析的知识。在半学年内，课程可以讲授模拟和数字通信系统的基础（第3章至第7章），数字通信系统分析（第11章）和扩频通信（第12章）。

## 四分之一学年教程（没有概率论方面的知识背景）

在一些很不常见的情况下，学生不具备太多的概率论知识，分离出通信系统的基础知识就很重要。最好不要试图深入分析数字通信系统，可以讲授不需要概率论方面知识的模拟和数字通信系统的工作原理（第1章至第7章）和更高级的关于无线扩频系统的讨论（第12章）。

## 两个四分之一学年教程（有基础的概率论知识背景）

和单个四分之一学年教程不同，一个双四分之一学年模式可以较好地讲授通信系统的大部分重要内容及其分析。只要学生学过一些关于傅里叶分析和概率论方面的预备知识，整本教材就可以延伸到

两个四分之一学年当中。在讲授第 1 章至第 3 章和第 8 章时，有必要采用学习新知识和复习已有知识结合的方式，可以如下安排课时：

第一个四分之一学年：第 1 章至第 10 章（通信系统及其分析）

第二个四分之一学年：第 11 章至第 15 章（数字通信系统）

## **MATLAB 和实验**

由于很多学校不再设置通信系统的硬件实验室，基于通信系统的 MATLAB 实验将被用来加强学生的学习经验。学生可以在计算机上设计系统并调整参数，通过计算机显示和误码率来测试通信系统的整体性能，以获取关于设计和仿真通信系统的第一手知识。

## **感谢**

首先，作者们要感谢这些年来听课的学生，没有学生的大量反馈信息和与他们之间的多次讨论，这个新版本无法出版。还要感谢所有审稿人为提高质量提供的宝贵意见。最后，作者还要感谢南非开普敦大学的 Norman Morrison 教授，他建议在本书中新增了习题 8-2.3。

B. P. 拉兹  
丁峙

# PREFACE

The chief objective of the fourth edition is to respond to the tremendous amount of technological progress in communication systems we have witnessed over the decade since the third edition was published. At the same time, newer software and teaching tools have also become available, making it much easier to provide solid and illustrative examples as well as more experimental opportunities for students. In this new edition, major changes are implemented to incorporate recent technological advances of telecommunications. To captivate students' attention and make it easier for students to relate the course materials to their daily experience with communication tools, we will provide relevant information on the operation and features of cellular systems, wireless local area networks (LANs), and wire-line (digital subscriber loop or DSL) internet services, among others.

## Major Revision

A number of critical changes are motivated by the need to emphasize the fundamentals of digital communication systems that have permeated our daily lives. Specifically, in light of the widespread applications of new technologies such as spread spectrum and orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), we present two new chapters: Chapter 12 on spread spectrum communications and Chapter 13 on frequency-selective channels and OFDM systems. As practical examples of such systems, we provide a basic introduction of current wireless communication standards including cellular systems and IEEE 802.11a/b/g/n wireless LAN systems. In addition, we summarize the latest in DSL modem technology and services. At the fundamental level, information theory and coding have also been transformed by several important new progresses. In this edition, we include the basic principles of multiple-input–multiple-output (MIMO) technology, which has just begun to see broad commercial applications. We also cover several notable breakthroughs in error correction coding, including soft decoding, turbo codes, and low-density parity check (LDPC) codes.

To enhance the learning experience and to give students opportunities for computer-based experimental practices, relevant MATLAB examples and exercises have been provided in chapters that can be enhanced by these hands-on experiments.

## Organization

With respect to organization, we begin the fourth edition with a traditional review of signal and system fundamentals before proceeding to the core communication topics of analog modulation and digital pulse-coded modulation. We then present the fundamental tools of probability theory and random processes to be used in the design and analysis of digital communications in the rest of this text. After the fundamentals of digital communication systems have been covered, the last two chapters provide an overview of information theory and the fundamentals of forward error correction codes.

Ideally, the communications subjects germane to this text should be covered in two courses: one on the basic operations of communication systems and one on the analysis of modern communication systems under noise and other distortions. The former relies heavily on deterministic analytical tools such as Fourier series, the Fourier transform, and the sampling theorem, while the latter relies on tools from probability and random processes to tackle the unpredictability of message signals and noises. In today's academic environment, however, with so many competing courses, it may be difficult to squeeze two basic courses on communications into a typical electrical engineering curriculum. Some universities do require a course in probability and random processes as a prerequisite. In that case, it is pos-

sible to cover both areas reasonably well in a one-semester course. This book is designed for adoption in both cases. It can be used as a one-semester course in which the deterministic aspects of communication systems are emphasized with little consideration of the effects of noise and interference. It can also be used for a course that deals with both the deterministic and the probabilistic aspects of communication systems. The book is self-contained, since it provides all the necessary background in probabilities and random processes. As stated earlier, however, if both deterministic and probabilistic aspects of communications are to be covered in one semester, it is highly desirable for students to have a good background in probabilities.

Chapter 1 introduces a panoramic view of communication systems. Important concepts of communication theory are explained qualitatively in a heuristic way. This attracts the students to the topics of communications. With this momentum, students are motivated to study the tools of signal analysis in Chapters 2 and 3, which encourage them to see a signal as a vector, and to think of the Fourier spectrum as a way of representing a signal in terms of its vector components. Chapters 4 and 5 discuss amplitude (linear) and angle (nonlinear) modulations, respectively. Many instructors feel that in this digital age, modulation should be deemphasized with a minimal presence. We hold the view that modulation is not so much a method of communication as a basic tool of signal processing; it will always be needed, not only in the area of communication (digital or analog), but also in many other areas of electrical engineering. Hence, neglecting modulation may prove to be rather shortsighted. Chapter 6 serves as the fundamental link between analog-and-digital communications by describing the process of analog-to-digital conversion (ADC). It provides the details of sampling, pulse code modulation (including DPCM), delta modulation, speech coding (vocoder), image/video coding, and compression. Chapter 7 discusses the principles and techniques used in digital modulations. It introduces the concept of channel distortion and presents equalization as an effective means of compensating for distortion.

Chapters 8 and 9 provide the essential background on theories of probability and random processes, which comprise the second tool required for the study of communication systems. Every attempt is made to motivate students and to elevate their interest through these chapters by providing applications to communications problems wherever possible. Chapters 10 and 11 present the analysis of analog and digital communication systems in the presence of noise. Optimum signal detection in digital communication is thoroughly presented in Chapter 11. Chapter 12 focuses on spread spectrum communications. Chapter 13 presents various practical techniques that can be used to combat practical channel distortions. This chapter will capture both channel equalization and the broadly applied technology of OFDM. Chapter 14 provides an overview of information theory. Finally, the principle and key practical aspects of error control coding are given in Chapter 15.

One of the aims of writing this book has been to make learning a pleasant or at least a less intimidating experience for students by presenting the subject in a clear, understandable, and logically organized manner. Every effort has been made to deliver an insight—rather than just an understanding—as well as heuristic explanations of theoretical results wherever possible. Many examples are provided for further clarification of abstract results. Even a partial success in achieving this stated goal would make all our efforts worthwhile.

## **A Whole New World**

There have been a number of major technology developments since the publication of the third edition in 1998. First of all, the cellular telephone has deeply penetrated the daily lives of urban and suburban households in most developed and even developing nations. In 1998 there were very few students with beepers and cellphones in the classrooms. Now, nearly every college student has a cellphone. Second, in 1998 most of the household internet connections were linked via low-speed (of approximately 28.8 kbit/s) voice modems. Today, a majority of our students are connected to cyberspace through high speed DSL or cable services. In addition,

wireless LAN has turned esoteric terms such as IEEE 802.11 into household names. Most students in the classroom have explored these technologies to some extent.

Vast technological advances have produced a new generation of students extremely interested in learning about the new technologies and their implementations. These students are eager to understand how and where they may be able to make contributions in the future. Such strong motivation must be encouraged and taken advantage of. This new edition will enable instructors either to cover the topics themselves or to assign reading materials that will allow the students to acquire relevant information. The new edition achieves these goals by stressing the digital aspects of the text and by incorporating the most commonly known wireless and wire-line digital technologies.

### **Course Adoption**

With a combined teaching experience of over 50 years, we have taught communication classes under both quarter and semester systems in several major universities. On the other hand, the students' personal experiences with communication systems have continuously been multiplying, from a simple radio set in the 1960s, to the turn of the twenty-first century, with its easy access to wireless LAN, cellular devices, satellite radio, and home internet services. Hence, more and more students are interested in learning how familiar electronic gadgets work. With this important need and our past experiences in mind, we revised the fourth edition of this text to fit well within several different curriculum configurations. In all cases, basic coverage should teach the fundamentals of analog and digital communications (Chapters 1–7).

### **One-Semester Course (without strong probability background)**

In many existing curricula, undergraduate students are not exposed to simple probability tools until they begin to take communications. This occurs often because the students were required to take an introductory statistical course disconnected from engineering science. This text is well suited to students of such a background. The first seven chapters form a comprehensive coverage of modern digital and analog communication systems for average ECE undergraduate students. Such a course can be taught within one semester (40–45 instructional hours). Under the premise that each student has built a solid background in Fourier analysis via a prerequisite class on *signals and systems*, most of the first three chapters can be treated as a review in a single week. The rest of the semester can be fully devoted to teaching Chapters 4 to 7, with partial coverage on the practical systems of Chapters 12 and 13 to enhance students interest.

### **One-Semester Course (with a strong probability background)**

For curricula that have strengthened the background coverage of probability theory, a much more extensive coverage of digital communications can be achieved within one semester. A rigorous probability class can be taught within the context of signal and system analysis (cf. Cooper and McGillem, *Probabilistic Methods of Signal and System Analysis*, Oxford University Press, 1999, ISBN: 0195123549). For this scenario, in addition to Chapters 1 to 7, Chapter 11 and part of Chapter 13 on equalization can also be taught in one semester, provided the students have a solid probability background that permits the coverage of Chapter 8 and Chapter 9 in a few hours. Students completing this course would be well prepared to enter the telecommunications industry or to continue in a program of graduate studies.

### **Two-Semester Series (without a separate probability course)**

The entire text can be thoroughly covered in two semesters for a curriculum that does not have any prior probability course. In other words, for a two-course series, the goal is to teach both communication systems and fundamentals of probabilities. In an era of many competing courses in the ECE curriculum, it is hard to set aside two semester courses for communications alone. On the other hand, most universities do have a probability course that is separately

taught by nonengineering professors. In this scenario it would be desirable to fold probability theory into the two communication courses. Thus, for two semester courses, the coverage can be as follows:

- 1st semester: Chapters 1–7 (Signals and Communication Systems)
- 2nd semester: Chapters 8–13 (Modern Digital Communication Systems)

### **One-Quarter Course (with a strong probability background)**

In a quarter system, students must have prior exposure to probability and statistics at a rigorous level (cf. Cooper and McGillem, *Probabilistic Methods of Signal and System Analysis*, Oxford University Press, 1999, ISBN: 0195123549). They must also have solid knowledge of Fourier analysis. Within a quarter, the class can teach the basics of analog and digital communication systems (Chapters 3–7), analysis of digital communication systems (Chapter 11), and spread spectrum communications (Chapter 12).

### **One-Quarter Course (without a strong probability background)**

In the rare case of students who come in without much probability knowledge, it is important to impart basic knowledge of communication systems. It is wise not to attempt to analyze digital communication systems. Instead, the basic coverage without prior knowledge of probability can be achieved by teaching the operations of analog and digital systems (Chapters 1–7) and a high-level discussion of spread spectrum wireless systems (Chapter 12).

### **Two-Quarter Series (with basic probability background)**

Unlike a one-quarter course, a two-quarter series can be well designed to teach most of the important materials on communication systems and their analysis. The entire text can be extensively taught in two quarters for a curriculum that has some preliminary coverage of Fourier analysis and probabilities. Essentially using Chapters 1 to 3 and Chapter 8 as partly new and partly review, the coverage can be as follows:

- 1st quarter: Chapters 1–10 (Communication Systems and Analysis)
- 2nd quarter: Chapters 11–15 (Digital Communication Systems)

### **MATLAB and Laboratory Experience**

Since many universities no longer have hardware communication laboratories, MATLAB based communication system exercises will be made available to enhance the learning experience. Students will be able to design systems and modify their parameters to evaluate the overall effects on the performance of communication systems through computer displays and bit error rate measurement. The students will acquire first-hand knowledge of how to design and perform simulations of communication systems.

### **Acknowledgments**

First, the authors would like to thank all the students they have had over the years. This edition would not have been possible without much feedback from, and many discussions with, our students. The authors thank all the reviewers for providing invaluable inputs to improve the text. Finally, the authors also wish to thank Professor Norman Morrison, University of Cape Town, for suggesting a new problem P8-2.3 in this edition.

B.P. Lathi  
Zhi Ding

# 目录概览

第 1 章 简介 .....	1
1.1 通信系统 .....	1
1.2 模拟和数字消息 .....	4
1.3 信道影响、信噪比和信道容量 .....	9
1.4 调制和检测 .....	11
1.5 数字信源编码和纠错编码 .....	13
1.6 现代电信历史的简短回顾 .....	15
第 2 章 信号与信号空间 .....	20
2.1 信号的度量 .....	20
2.2 信号分类 .....	25
2.3 一些有用的信号操作 .....	28
2.4 单位脉冲信号 .....	32
2.5 信号与向量 .....	34
2.6 信号相关性 .....	41
2.7 正交信号集 .....	47
2.8 三角傅里叶级数 .....	51
2.9 指数傅里叶级数 .....	61
2.10 MATLAB 练习 .....	69
第 3 章 信号的分析与传输 .....	91
3.1 非周期信号的傅里叶表示 .....	91
3.2 一些有用函数的变换 .....	99
3.3 傅里叶变换的性质 .....	106
3.4 线性系统中的信号传输 .....	123
3.5 理想的和实际的滤波器 .....	129
3.6 通信信道上的信号失真 .....	133
3.7 信号能量和能量谱密度 .....	139
3.8 信号功率和功率谱密度 .....	148
3.9 离散傅里叶变换 .....	155
3.10 MATLAB 练习 .....	160
第 4 章 幅度调制与解调 .....	178
4.1 基带和载波通信 .....	178
4.2 双边带幅度调制 .....	180
4.3 幅度调制 (AM) .....	190
4.4 有效带宽幅度调制 .....	197
4.5 幅度调制: 残留边带 (VSB) .....	206

4.6	本地载波同步 .....	210
4.7	频分复用 (FDM) .....	211
4.8	锁相环及其应用 .....	212
4.9	NTSC 电视广播系统 .....	220
4.10	MATLAB 练习 .....	230
<b>第 5 章</b>	<b>角度调制与解调 .....</b>	<b>252</b>
5.1	非线性调制 .....	252
5.2	调角波的带宽 .....	259
5.3	调频 (FM) 波的产生 .....	272
5.4	调频信号解调 .....	281
5.5	非线性失真和干扰的影响 .....	284
5.6	超外差式模拟 AM/FM 接收机 .....	289
5.7	调频广播系统 .....	291
5.8	MATLAB 练习 .....	292
<b>第 6 章</b>	<b>采样和模数转换 .....</b>	<b>302</b>
6.1	采样定理 .....	302
6.2	脉冲编码调制 (PCM) .....	319
6.3	数字电话: PCM 在 T1 载波系统中的应用 .....	332
6.4	数字复用 .....	336
6.5	差分脉冲编码调制 (DPCM) .....	341
6.6	自适应差分 PCM (ADPCM) .....	345
6.7	增量调制 .....	346
6.8	语音编码器和视频压缩 .....	351
6.9	MATLAB 练习 .....	361
<b>第 7 章</b>	<b>数字传输原理 .....</b>	<b>377</b>
7.1	数字通信系统 .....	377
7.2	线性编码 .....	380
7.3	脉冲整形 .....	394
7.4	扰码 .....	406
7.5	数字接收机和再生中继器 .....	409
7.6	眼图: 一个重要工具 .....	417
7.7	PAM: 高数据率的 M 相基带信号 .....	420
7.8	数字载波系统 .....	423
7.9	M 相数字载波调制 .....	431
7.10	MATLAB 练习 .....	437
<b>第 8 章</b>	<b>概率论基础 .....</b>	<b>447</b>
8.1	概率的概念 .....	447
8.2	随机变量 .....	462
8.3	统计平均值 (期望) .....	481
8.4	相关性 .....	490



8.5	线性均方估计 .....	494
8.6	随机变量的和 .....	497
8.7	中心极限定理 .....	500
<b>第 9 章</b>	<b>随机过程和谱分析 .....</b>	<b>511</b>
9.1	从随机变量到随机过程 .....	511
9.2	随机过程分类 .....	516
9.3	功率谱密度 .....	520
9.4	多重随机过程 .....	534
9.5	线性系统中的随机过程 .....	535
9.6	应用: 最优滤波 (Wiener-Hopf 滤波器) .....	539
9.7	应用: 基带模拟系统的性能分析 .....	542
9.8	应用: 最优预加重 - 去加重系统 .....	544
9.9	带通随机过程 .....	547
<b>第 10 章</b>	<b>噪声环境下调制通信系统的性能分析 .....</b>	<b>564</b>
10.1	衡量标准分析 .....	564
10.2	幅度调制系统 .....	565
10.3	角度调制系统 .....	574
10.4	脉冲调制系统 .....	591
<b>第 11 章</b>	<b>数字通信系统的性能分析 .....</b>	<b>605</b>
11.1	双极性信号的最优线性检测 .....	605
11.2	常见的二进制信号 .....	611
11.3	数字载波调制的相干接收机 .....	619
11.4	最优检测的信号空间分析 .....	624
11.5	白噪声随机过程的矢量分解 .....	629
11.6	白高斯噪声信道的最优接收机 .....	635
11.7	最优接收机误差概率的一般表达式 .....	660
11.8	等价信号集 .....	668
11.9	非白 (有色) 信道噪声 .....	676
11.10	其他有用的性能指标 .....	677
11.11	非相干检测 .....	680
11.12	MATLAB 练习 .....	688
<b>第 12 章</b>	<b>扩频通信 .....</b>	<b>714</b>
12.1	跳频扩频 (FHSS) 系统 .....	714
12.2	多用户跳频系统及其性能 .....	718
12.3	跳频扩频的应用 .....	721
12.4	直接序列扩频 (DSSS) .....	724
12.5	DSSS 的弹性特征 .....	728
12.6	DSSS 的码分多址接入 (CDMA) .....	730
12.7	多用户检测 (MUD) .....	737
12.8	现代实用直扩 CDMA 系统 .....	743
12.9	MATLAB 练习 .....	751