

国外电子与通信教材系列

权威作者 经典力作

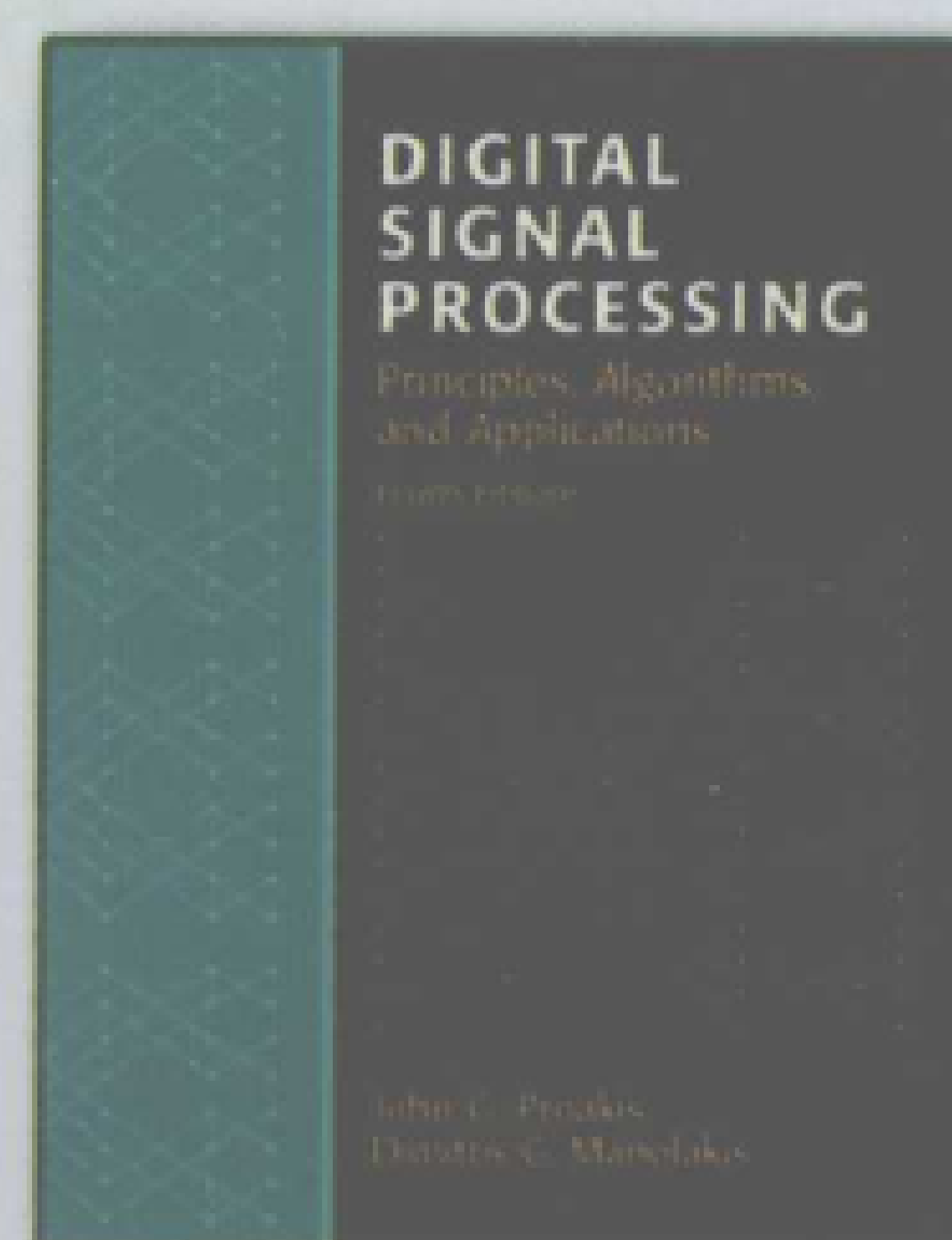
英文版

PEARSON
Prentice
Hall

数字信号 处理

(第四版)

Digital Signal Processing
Principles, Algorithms,
and Applications
Fourth Edition



[美] John G. Proakis 著
Dimitris G. Manolakis



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

数字信号处理

(第四版) (英文版)

Digital Signal Processing

Principles, Algorithms, and Applications

Fourth Edition

[美] John G. Proakis 著
Dimitris G. Manolakis

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书为电气工程、计算机工程和计算机科学的学生给出了离散时间信号、系统和现代数字处理算法及应用的基础知识。涉及的内容包括：时域与频域方法，用以进行线性分析、离散时间系统分析；采样、数字滤波器设计、滤波器实现、去卷积、插值、状态空间方法、频频分析等。此外，本书还为学生提供了大量的示例、练习以及实验，以便强调数据信号处理算法的软件实现。本书自1995年出版上一版以来，已更新了许多内容，并添加了使用MATLAB实现的内容。

本书可作为相关专业高等院校的本科生和研究生的教学用书，也可供技术人员及自学人员使用。

English reprint Copyright © 2007 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications, Fourth Edition, ISBN: 0131873741 by John G. Proakis and Dimitris G. Manolakis. Copyright © 2007. All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书英文影印版由电子工业出版社和Pearson Education培生教育出版亚洲有限公司合作出版。未经出版者预先书面许可，不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有Pearson Education培生教育出版集团激光防伪标签，无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号 图字：01-2007-2896

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理 = Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications, Fourth Edition: 第4版: 英文 / (美) 普埃克 (Proakis J. G.) 等著; —北京: 电子工业出版社, 2007.6

(国外电子与通信教材系列)

ISBN 978-7-121-04042-9

I. 数... II. 普... III. 数字信号—信号处理—教材—英文 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第074787号

责任编辑：谭海平

印刷：北京牛山世兴印刷厂

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 × 980 1/16 印张：69.5 字数：2312千字

印次：2007年6月第1次印刷

定价：98.00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 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 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

本书是作者在近几年来为本科生和研究生讲授数字信号处理课程的基础上编写的,主要介绍离散时间信号、系统和现代数字处理的基础知识,以及它们在电子工程、计算机工程和计算机科学等专业方面的应用。本书可作为本科生在离散系统和数字信号处理方面的一学期或两学期课程的教材,同时也可作为一年级研究生在数字信号处理方面的一学期课程的教材。

本书假定学生事先已掌握了积分学(包括常微分方程)和连续时间信号的线性系统的知识(包括拉普拉斯变换)。虽然本书第4章将描述周期或非周期信号的傅里叶级数和傅里叶变换,但我们期望读者在先修课程中已经了解了这部分内容。

本书在理论知识和实际应用之间进行了较好的折中。书中提供了大量经过精心设计的习题,以便帮助学生掌握课程的内容。解答手册仅供教师下载。此外,在出版社的网站上为教师准备了图表及幻灯片。

在本书的第四版中,我们增加了关于自适应滤波器的新章节,并陆续修改和更新了关于多采样率数字信号处理、信号采样和重建等章节。同时,增加了关于离散余弦变换的新内容。

第1章描述模拟信号的模数转换过程所涉及到的操作。描述了正弦信号的采样过程,解释了混叠问题,并且对信号量化和数模转换的一般术语进行了描述,但分析部分将留待后续章节描述。

第2章主要论述时域的线性时不变(移不变)离散时间系统和离散时间信号。导出了卷积和,并根据系统的冲激响应周期将其分为有限长冲激响应(FIR)和无限长冲激响应(IIR)。描述了由差分方程表征的线性时不变系统,并得到了具有初始条件的差分方程的解。本章最后总结了离散时间相关性问题。

第3章介绍 z 变换,包括双边 z 变换和单边 z 变换,并给出了确定逆 z 变换的方法。论述了在线性时不变系统的分析过程中如何使用 z 变换,并证实了系统的重要特性都与 z 域特征有关,如因果性和稳定性。

第4章论述频域中的信号分析。描述了连续时间信号和离散时间信号的傅里叶级数和傅里叶变换。

在第5章中,通过频率响应函数表征了频域中的线性时不变(LTI)离散时间系统,并确定了对周期和非周期信号的响应。描述了一些重要类型的离散时间系统,包括共鸣器、槽口滤波器、梳状滤波器、全通滤波器和振荡器等。同时,也考察了一些简单FIR和IIR滤波器的设计。此外,还介绍了最小相位、混合相位和最大相位系统的概念以及去卷积的问题。

第6章讲述连续时间信号的采样以及由采样信号重建原始信号的内容。所涉及的范围包括带通信号的采样和重建、离散时间信号的采样以及模数和数模转换过程。本章中还包含有对过采样的模数和数模转换器的处理。

第7章讨论DFT的性质和应用。描述了用DFT执行线性滤波的两种方法,并说明了使用DFT对信号进行频率分析的方法。本章最后讨论了离散余弦变换。

第8章涉及DFT的有效计算。本章描述了基2、基4和分裂基快速傅里叶变换(FFT)算法,以及FFT算法在卷积和相关计算中的应用。对于用线性滤波计算DFT的方法,介绍了Goertzel算法和线性调频 z 变换这两种方法。

第9章介绍IIR和FIR系统的实现方法。包括直接型、级联型、并联型、格型和带抽头的格型滤波器结构的实现。本章同时分析了在数字实现FIR和IIR系统过程中的量化效应。

第10章介绍数字FIR和IIR滤波器的设计技术。设计技术包括离散时间的直接方法和通过各种变换将模拟滤波器转换成数字滤波器的方法。

第11章介绍采样率变换及其在多采样率数字信号处理中的应用。除了描述了通过整数和有理数因子的抽取和插值之外,还介绍了对于任意因子的采样率转换方法,以及多相位滤波器结构的实现。本章还讨论了数字滤波器组、二通道的正交镜像滤波器(QMF)和 M 通道的QMF组。

第12章介绍线性预测和最优线性维纳滤波器。本章还描述了求解归一化方程的Levinson-Durbin算法和Schur算法,以及AR格型和ARMA格型抽头滤波器。

第13章介绍基于LMS算法和递归最小平方(RLS)算法的单通道自适应滤波器。直接型FIR和格型RLS算法及滤波器结构均在本章介绍。

第14章讲述功率谱估计。描述了不带参数的方法和基于模型(带参数的)的方法,还描述了基于特征组合的方法,包括MUSIC和ESPRIT。

事先已经学习过离散系统的高年级学生,可以先快速浏览第1章至第5章的内容,然后仔细学习第6章至第10章的内容。

对于研究生一年级的数字信号处理课程,前六章供学生复习离散时间系统,教师可以快速浏览大部分内容,然后讲述第7章到第11章的内容,再选讲第12章至第14章的部分内容。

本书中提供了很多例题和近500道习题。部分习题的答案列在本书的后面。很多习题可以通过类似MATLAB这样的软件包在计算机上得到数值解。学生还可以使用本书配套的手册*Student Manual for Digital Signal Processing with MATLAB*。MATLAB软件是本教材的基本软件工具。教师可能还希望参考其他一些包含有计算机练习的补充教材,例如,由C. S. Burrus等编写的*Computer-Based Exercises for Signal Processing Using MATLAB* (Prentice Hall, 1994)。

我们受益于很多有才华的同事,他们通过阅览本书前几版提供了许多有价值的建议,其中有W. E. Alexander, G. Arslan, Y. Bresler, J. Deller, F. DePiero, V. Ingle, J. S. Kang, C. Keller, H. Lev-Ari, L. Merakos, W. Mikhael, P. Monticillo, C. Nikias, M. Schetzen, E. Serpedin, T. M. Sullivan, H. Trussell, S. Wilson和M. Zoltowski。我们同时基于R. Price的建议及其他相关见解,增加了关于分裂基FFT算法的内容。最后,我们要感谢许多那些已毕业的学生的建议和意见,特别是A. L. Kok, J. Lin, E. Sozer和S. Srinidhi,他们协助准备了几幅图表和解答手册。

John G. Proakis
Dimitris G. Manolakis

Contents

1	Introduction	1
	绪论	
1.1	Signals, Systems, and Signal Processing	2
	信号、系统和信号处理	
1.1.1	Basic Elements of a Digital Signal Processing System	4
	数字信号处理系统的基本组成	
1.1.2	Advantages of Digital over Analog Signal Processing	5
	数字信号处理与模拟信号处理相比的优点	
1.2	Classification of Signals	6
	信号分类	
1.2.1	Multichannel and Multidimensional Signals	6
	多通道信号与多维信号	
1.2.2	Continuous-Time Versus Discrete-Time Signals	9
	连续时间信号和离散时间信号	
1.2.3	Continuous-Valued Versus Discrete-Valued Signals	10
	连续值信号与离散值信号	
1.2.4	Deterministic Versus Random Signals	11
	确定性信号与随机信号	
1.3	The Concept of Frequency in Continuous-Time and Discrete-Time Signals	12
	连续时间信号与离散时间信号中的频率概念	
1.3.1	Continuous-Time Sinusoidal Signals	12
	连续时间正弦信号	
1.3.2	Discrete-Time Sinusoidal Signals	14
	离散时间正弦信号	
1.3.3	Harmonically Related Complex Exponentials	17
	谐相关的复指数信号	
1.4	Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Conversion	19
	模数和数模转换	
1.4.1	Sampling of Analog Signals	21
	模拟信号采样	
1.4.2	The Sampling Theorem	26
	采样定理	
1.4.3	Quantization of Continuous-Amplitude Signals	31
	连续幅度信号的量化	
1.4.4	Quantization of Sinusoidal Signals	34
	正弦信号的量化	

1.4.5	Coding of Quantized Samples 量化采样信号的编码	35
1.4.6	Digital-to-Analog Conversion 数模转换	36
1.4.7	Analysis of Digital Signals and Systems Versus Discrete-Time Signals and Systems 数字信号与系统及离散时间信号与系统的分析	36
1.5	Summary and References 小结和参考文献	37
	Problems 习题	37
2	Discrete-Time Signals and Systems 离散时间信号与系统	41
2.1	Discrete-Time Signals 离散时间信号	42
2.1.1	Some Elementary Discrete-Time Signals 离散时间信号的基本元素	43
2.1.2	Classification of Discrete-Time Signals 离散时间信号的分类	45
2.1.3	Simple Manipulations of Discrete-Time Signals 离散时间信号的简单处理	50
2.2	Discrete-Time Systems 离散时间系统	53
2.2.1	Input-Output Description of Systems 系统的输入 - 输出描述	54
2.2.2	Block Diagram Representation of Discrete-Time Systems 离散时间系统的结构图表示	57
2.2.3	Classification of Discrete-Time Systems 离散时间系统的分类	59
2.2.4	Interconnection of Discrete-Time Systems 离散时间系统的互连	67
2.3	Analysis of Discrete-Time Linear Time-Invariant Systems 离散时间线性时不变系统的分析	69
2.3.1	Techniques for the Analysis of Linear Systems 线性系统的分析方法	69
2.3.2	Resolution of a Discrete-Time Signal into Impulses 离散时间信号分解为冲激信号	71
2.3.3	Response of LTI Systems to Arbitrary Inputs: The Convolution Sum LTI 系统对任意输入的响应: 卷积和	73
2.3.4	Properties of Convolution and the Interconnection of LTI Systems 卷积的性质以及 LTI 系统的互连	80

2.3.5	Causal Linear Time-Invariant Systems 因果 LTI 系统	83
2.3.6	Stability of Linear Time-Invariant Systems 线性时不变系统的稳定性	85
2.3.7	Systems with Finite-Duration and Infinite-Duration Impulse Response 有限长和无限长冲激响应的系统	88
2.4	Discrete-Time Systems Described by Difference Equations 由差分方程描述的离散时间系统	89
2.4.1	Recursive and Nonrecursive Discrete-Time Systems 递归和非递归的离散时间系统	90
2.4.2	Linear Time-Invariant Systems Characterized by Constant-Coefficient Difference Equations 由常系数差分方程描述的线性时不变系统的特性	93
2.4.3	Solution of Linear Constant-Coefficient Difference Equations 线性常系数差分方程的解	98
2.4.4	The Impulse Response of a Linear Time-Invariant Recursive System 线性时不变递归系统的冲激响应	106
2.5	Implementation of Discrete-Time Systems 离散时间系统的实现	109
2.5.1	Structures for the Realization of Linear Time-Invariant Systems 线性时不变系统的实现结构	109
2.5.2	Recursive and Nonrecursive Realizations of FIR Systems FIR 系统的递归和非递归实现	113
2.6	Correlation of Discrete-Time Signals 离散时间信号的相关性	116
2.6.1	Crosscorrelation and Autocorrelation Sequences 互相关和自相关序列	118
2.6.2	Properties of the Autocorrelation and Crosscorrelation Sequences 自相关和互相关序列的性质	120
2.6.3	Correlation of Periodic Sequences 周期序列的相关性	123
2.6.4	Input-Output Correlation Sequences 输入 - 输出相关序列	125
2.7	Summary and References 小结和参考文献	128
	Problems 习题	129
3	The z-Transform and Its Application to the Analysis of LTI Systems z 变换及其在线性时不变系统分析中的应用	147
3.1	The z-Transform z 变换	147

3.1.1	The Direct z -Transform z 正变换	147
3.1.2	The Inverse z -Transform z 逆变换	156
3.2	Properties of the z -Transform z 变换的性质	157
3.3	Rational z -Transforms 有理 z 变换	170
3.3.1	Poles and Zeros 极点和零点	170
3.3.2	Pole Location and Time-Domain Behavior for Causal Signals 因果信号的极点位置和时域行为	174
3.3.3	The System Function of a Linear Time-Invariant System 线性时不变系统的系统函数	177
3.4	Inversion of the z -Transform z 逆变换	180
3.4.1	The Inverse z -Transform by Contour Integration 围线积分法求 z 逆变换	180
3.4.2	The Inverse z -Transform by Power Series Expansion 幂级数展开法求 z 逆变换	182
3.4.3	The Inverse z -Transform by Partial-Fraction Expansion 部分分式展开法求 z 逆变换	184
3.4.4	Decomposition of Rational z -Transforms 有理 z 变换的分解	192
3.5	Analysis of Linear Time-Invariant Systems in the z -Domain z 域线性时不变系统的分析	193
3.5.1	Response of Systems with Rational System Functions 有理系统函数的系统响应	194
3.5.2	Transient and Steady-State Responses 暂态响应和稳态响应	195
3.5.3	Causality and Stability 因果性和稳定性	196
3.5.4	Pole-Zero Cancellations 零极点抵消	198
3.5.5	Multiple-Order Poles and Stability 多重极点和稳定性	200
3.5.6	Stability of Second-Order Systems 二阶系统的稳定性	201
3.6	The One-sided z -Transform 单边 z 变换	205
3.6.1	Definition and Properties 定义和性质	206
3.6.2	Solution of Difference Equations 差分方程的求解	210

3.6.3	Response of Pole–Zero Systems with Nonzero Initial Conditions 具有非零初始条件的零极点系统的响应	211
3.7	Summary and References 小结和参考文献	214
	Problems 习题	214
4	Frequency Analysis of Signals 信号的频率分析	224
4.1	Frequency Analysis of Continuous-Time Signals 连续时间信号的频率分析	225
4.1.1	The Fourier Series for Continuous-Time Periodic Signals 连续时间周期信号的傅里叶级数	226
4.1.2	Power Density Spectrum of Periodic Signals 周期信号的功率密度谱	230
4.1.3	The Fourier Transform for Continuous-Time Aperiodic Signals 连续时间非周期信号的傅里叶变换	234
4.1.4	Energy Density Spectrum of Aperiodic Signals 非周期信号的能量密度谱	238
4.2	Frequency Analysis of Discrete-Time Signals 离散时间信号的频率分析	241
4.2.1	The Fourier Series for Discrete-Time Periodic Signals 离散时间周期信号的傅里叶级数	241
4.2.2	Power Density Spectrum of Periodic Signals 周期信号的功率密度谱	245
4.2.3	The Fourier Transform of Discrete-Time Aperiodic Signals 离散时间非周期信号的傅里叶变换	248
4.2.4	Convergence of the Fourier Transform 傅里叶变换的收敛性	251
4.2.5	Energy Density Spectrum of Aperiodic Signals 非周期信号的能量密度谱	254
4.2.6	Relationship of the Fourier Transform to the z -Transform 傅里叶变换和 z 变换的关系	259
4.2.7	The Cepstrum 倒谱	261
4.2.8	The Fourier Transform of Signals with Poles on the Unit Circle 单位圆上有极点的信号的傅里叶变换	262
4.2.9	Frequency-Domain Classification of Signals: The Concept of Bandwidth 信号的频域分类: 带宽的概念	265
4.2.10	The Frequency Ranges of Some Natural Signals 某些自然信号的频率范围	267
4.3	Frequency-Domain and Time-Domain Signal Properties 频域和时域的信号特性	268

4.4	Properties of the Fourier Transform for Discrete-Time Signals	271
	离散时间信号傅里叶变换的性质	
4.4.1	Symmetry Properties of the Fourier Transform 傅里叶变换的对称性质	272
4.4.2	Fourier Transform Theorems and Properties 傅里叶变换的定理和性质	279
4.5	Summary and References	291
	小结和参考文献	
	Problems	292
	习题	
5	Frequency-Domain Analysis of LTI Systems	300
	LTI 系统的频域分析	
5.1	Frequency-Domain Characteristics of Linear Time-Invariant Systems	300
	线性时不变系统的频域特性	
5.1.1	Response to Complex Exponential and Sinusoidal Signals: The Frequency Response Function 对复指数和正弦信号的响应: 频率响应函数	301
5.1.2	Steady-State and Transient Response to Sinusoidal Input Signals 正弦输入信号的稳态和暂态响应	310
5.1.3	Steady-State Response to Periodic Input Signals 周期输入信号的稳态响应	311
5.1.4	Response to Aperiodic Input Signals 非周期输入信号的响应	312
5.2	Frequency Response of LTI Systems	314
	LTI 系统的频率响应	
5.2.1	Frequency Response of a System with a Rational System Function 具有有理系统函数的系统的频率响应	314
5.2.2	Computation of the Frequency Response Function 频率响应函数的计算	317
5.3	Correlation Functions and Spectra at the Output of LTI Systems	321
	LTI 系统输出的相关函数和频谱	
5.3.1	Input-Output Correlation Functions and Spectra 输入-输出相关函数和频谱	322
5.3.2	Correlation Functions and Power Spectra for Random Input Signals 随机输入信号的相关函数和功率谱	323
5.4	Linear Time-Invariant Systems as Frequency-Selective Filters	326
	作为频率选择滤波器的线性时不变系统	
5.4.1	Ideal Filter Characteristics 理想滤波器特性	327
5.4.2	Lowpass, Highpass, and Bandpass Filters 低通、高通和带通滤波器	329

5.4.3	Digital Resonators 数字共鸣器	335
5.4.4	Notch Filters 槽口滤波器	339
5.4.5	Comb Filters 梳状滤波器	341
5.4.6	All-Pass Filters 全通滤波器	345
5.4.7	Digital Sinusoidal Oscillators 数字正弦振荡器	347
5.5	Inverse Systems and Deconvolution 逆系统和去卷积	349
5.5.1	Invertibility of Linear Time-Invariant Systems 线性时不变系统的可逆性	350
5.5.2	Minimum-Phase, Maximum-Phase, and Mixed-Phase Systems 最小相位、最大相位及混合相位系统	354
5.5.3	System Identification and Deconvolution 系统辨识与去卷积	358
5.5.4	Homomorphic Deconvolution 同态去卷积	360
5.6	Summary and References 小结和参考文献	362
	Problems 习题	363
6	Sampling and Reconstruction of Signals 信号的采样与重建	384
6.1	Ideal Sampling and Reconstruction of Continuous-Time Signals 理想的连续时间信号采样与重建	384
6.2	Discrete-Time Processing of Continuous-Time Signals 连续时间信号的离散时间处理	395
6.3	Analog-to-Digital and Digital-to-Analog Converters 模数和数模转换器	401
6.3.1	Analog-to-Digital Converters 模数转换器	401
6.3.2	Quantization and Coding 量化与编码	403
6.3.3	Analysis of Quantization Errors 量化误差分析	406
6.3.4	Digital-to-Analog Converters 数模转换器	408

6.4	Sampling and Reconstruction of Continuous-Time Bandpass Signals	410
	连续时间带通信号的采样与重建	
6.4.1	Uniform or First-Order Sampling 均匀或一阶采样	411
6.4.2	Interleaved or Nonuniform Second-Order Sampling 交叉或非均匀二阶采样	416
6.4.3	Bandpass Signal Representations 带通信号的表示	422
6.4.4	Sampling Using Bandpass Signal Representations 利用带通信号表示进行采样	426
6.5	Sampling of Discrete-Time Signals	427
	离散时间信号采样	
6.5.1	Sampling and Interpolation of Discrete-Time Signals 离散时间信号采样和插值	427
6.5.2	Representation and Sampling of Bandpass Discrete-Time Signals 带通离散时间信号表示和采样	430
6.6	Oversampling A/D and D/A Converters	433
	过采样 A/D 和 D/A 转换器	
6.6.1	Oversampling A/D Converters 过采样 A/D 转换器	433
6.6.2	Oversampling D/A Converters 过采样 D/A 转换器	439
6.7	Summary and References	440
	小结和参考文献	
	Problems	440
	习题	
7	The Discrete Fourier Transform: Its Properties and Applications	449
	离散傅里叶变换的特性及应用	
7.1	Frequency-Domain Sampling: The Discrete Fourier Transform	449
	频域采样: 离散傅里叶变换	
7.1.1	Frequency-Domain Sampling and Reconstruction of Discrete-Time Signals 离散时间信号的频域采样和重建	449
7.1.2	The Discrete Fourier Transform (DFT) 离散傅里叶变换	454
7.1.3	The DFT as a Linear Transformation DFT 是线性变换	459
7.1.4	Relationship of the DFT to Other Transforms DFT 与其他变换的关系	461
7.2	Properties of the DFT	464
	DFT 的性质	

7.2.1	Periodicity, Linearity, and Symmetry Properties 周期性、线性和对称性	465
7.2.2	Multiplication of Two DFTs and Circular Convolution 两个 DFT 的乘法和圆周卷积	471
7.2.3	Additional DFT Properties DFT 的其他性质	476
7.3	Linear Filtering Methods Based on the DFT 基于 DFT 的线性滤波算法	480
7.3.1	Use of the DFT in Linear Filtering 在线性滤波中使用 DFT	481
7.3.2	Filtering of Long Data Sequences 长数据序列滤波	485
7.4	Frequency Analysis of Signals Using the DFT 利用 DFT 对信号进行频率分析	488
7.5	The Discrete Cosine Transform 离散余弦变换	495
7.5.1	Forward DCT FDCT	495
7.5.2	Inverse DCT IDCT	497
7.5.3	DCT as an Orthogonal Transform DCT 是正交变换	498
7.6	Summary and References 小结和参考文献	501
	Problems 习题	502
8	Efficient Computation of the DFT: Fast Fourier Transform Algorithms DFT 的有效计算：快速傅里叶变换算法	511
8.1	Efficient Computation of the DFT: FFT Algorithms DFT 的有效计算：FFT 算法	511
8.1.1	Direct Computation of the DFT 直接计算 DFT	512
8.1.2	Divide-and-Conquer Approach to Computation of the DFT 用分而治之的方法计算 DFT	513
8.1.3	Radix-2 FFT Algorithms 基 2 FFT 算法	519
8.1.4	Radix-4 FFT Algorithms 基 4 FFT 算法	527