

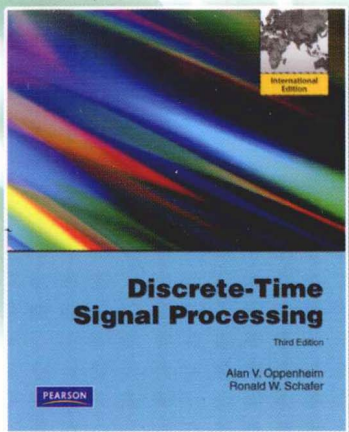
国外电子与通信教材系列

英文版

PEARSON

离散时间信号处理

(第三版)



Discrete-Time Signal Processing
Third Edition

[美] Alan V. Oppenheim 著
Ronald W. Schafer



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

离散时间信号处理

(第三版)

(英文版)

Discrete-Time Signal Processing

Third Edition

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书系统论述了离散时间信号处理的基本理论和方法,是国际信号处理领域中的经典权威教材。内容包括离散时间信号与系统, z 变换, 连续时间信号采样, 线性时不变系统的变换分析, 离散时间系统结构, 滤波器设计方法, 离散傅里叶变换, 离散傅里叶变换的计算, 利用离散傅里叶变换的信号傅里叶分析, 参数信号建模, 离散希尔伯特变换, 倒频分析和同态反卷积。本书例题和习题丰富, 具有实用价值。

本书适合从事数字信号处理工作的科技人员, 高等学校有关专业的高年级学生、研究生及教师使用。

Original edition, entitled DISCRETE-TIME SIGNAL PROCESSING, THIRD EDITION, 9780132067099 by OPPENHEIM, ALAN V., SCHAFFER, RONALD W., published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2010 by Pearson Education, Inc.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval system, without permission from Pearson Education, Inc.

China edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY copyright © 2011.

This edition is manufactured in the People's Republic of China, and is authorized for sale and distribution in the People's Republic of China exclusively(except Taiwan, Hong Kong SAR and Macau SAR).

本书英文影印版专有版权由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授予电子工业出版社。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。

本书在中国大陆地区生产, 仅限在中国大陆发行。

本书贴有 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: 01-2010-6421

图书在版编目 (CIP) 数据

离散时间信号处理 = Discrete-Time Signal Processing: 第3版: 英文 / (美) 奥本海姆 (Oppenheim, A. V.), (美) 谢弗 (Schaffer, R. W.) 著. - 北京: 电子工业出版社, 2011.1

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-12202-6

I. ①离... II. ①奥... ②谢... III. ①离散信号: 时间信号 - 信号处理 - 高等学校 - 教材 - 英文 IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 216715 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 马 岚

印 刷: 北京市天竺颖华印刷厂

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

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 × 980 1/16 印张: 71 字数: 2067 千字

印 次: 2011 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 99.80 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 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

Discrete-Time Signal Processing, Third Edition 是我们于 1975 年出版的 *Digital Signal Processing* 一书的延续。后者是本非常成功的教科书，出现在该技术领域还不成熟，刚开始进入快速发展的时期。当时，这个论题只在研究生阶段和为数不多的几所学校里讲授，1975 年出版的此书正是专门为这类课程写就的。目前，它仍在重印并依然在美国本土和国际范围内的许多学校中使用着。

到了 20 世纪 80 年代，信号处理研究、应用和实现技术的发展步伐都清晰地表明，数字信号处理 (DSP) 将实现并超越它在 20 世纪 70 年代就已显露出的巨大潜力。数字信号处理所萌发出的重要性，清楚地表明对原书进行修订和内容更新已势在必行。在筹划其修订版时，由于在该技术领域及相关课程的讲授水平和风格上都已经出现了很多变化，显然最佳方案是在原书的基础上重写一本新书，而原书仍可同时销售。我们将 1989 年出版的新书定名为 *Discrete-Time Signal Processing*，以强调该书所讨论的大部分理论和设计方法一般都是面向离散时间系统应用的，既可以是模拟的（时间上离散化了的模拟信号——译者注），也可以是数字的。

在编写 *Discrete-Time Signal Processing* 一书时，我们意识到 DSP 的基本原理已经普遍在大学本科阶段讲授了，有时甚至是作为有关离散时间线性系统的第一门课程中的一部分内容来讲授的，但更为普遍的是在第三学年和第四学年讲授，或者作为最初的研究生专题课来讲授。因此，在处理诸如线性系统、采样、多采样率信号处理、应用及谱分析之类的内容时进行大幅度扩展是合适的。另外，我们还用更多的例题来强调和说明一些重要概念。我们始终将精心构造的例题和课后作业放在重要的地位，因此这本书包括了 400 多道习题。

尽管该技术领域在理论和应用上还在继续发展，但其包含的基本原理和基础内容大多是一样的，只是在突出的重点上、理解上和教学方法上做了一些锤炼。因此，到 1999 年 *Discrete-Time Signal Processing* 出版了第二版。这个版本进行了大量修订，目的是让离散时间信号处理这一学科对于大学生和实际工程师们来说都更容易理解和接受，而没有在基本内容范围上做过多考虑。

Discrete-Time Signal Processing, Third Edition 是对第二版的重要修订。这个新版本响应了大学本科和研究生一年级阶段的课程讲授方法的改变及典型课程范围的变化，继承了重视学生和实际工程师们对于这些论题的可接受性，以及关注基本工作原理和广泛适用性的传统。新版本的一个主要特征是吸收并扩充了一些更为前沿的论题，以及为在该领域有效开展工作所必需的基础知识。新版对前版本中的每一章都进行了重要的审阅和修改，并新增了全新的一章，另外还有一章在当初本书第一版的基础上做了重要更新并重新编入。伴随第三版的问世，Rose-Hulman 技术学院的 Mark Yoder 和 Wayne Padgett 教授也开发完成了一个高度集成且交互性很强的配套网站，详细信息见书中关于网站的概述^①。

自第二版以来，我们已经持续讲授这门课程 10 多年了，照例也为作业布置和测验而新编了一些题目。我们总是非常重视精心构造的例题和作业题，所以在第三版中包含了从中精选的最好的

① 中国大陆地区销售的本书英文影印版不支持网站免费使用，需登录 www.pearsonhighered.com/oppenheim 并点击 [Website Purchase](#) 链接付费购买。采用本书的教师可获得授课用教辅资料，申请方式见书末“教学支持说明”。——编者注

130 道题，现在整本书的作业题总数超过了 700 道。包含在第二版中但未纳入第三版的习题，可以在网站上找到。

和本书的先前版本一样，我们假定读者已具备高等微积分的知识背景，并在复数和复变函数基础方面有较好的掌握。对包括拉普拉斯变换和傅里叶变换在内的连续时间信号的线性系统理论有所了解，仍然是一个基本的前提，而这些在大多数电气和机械工程系大学本科课程安排中都是会有的。同时，大多数本科课程中也普遍包含了离散时间信号与系统，离散时间傅里叶变换和连续时间信号的离散时间处理的初步知识。

给本科高年级学生和研究生讲授离散时间信号处理课程的经验告诉我们，从对这些论题进行仔细的回顾出发是很有必要的，这可以让学生从对基础内容的了解，对贯穿课程始终且伴随教科书的统一符号框架的熟悉，发展到可以学习更深入的内容。在本科低年级课程中关于离散时间信号处理的初步介绍，最通常的做法是让学生学习解决许多数学运算问题，但在重新整理这些题目时我们想让学生学习对一些基本概念做更深入的推理。因此，在这个版本的前五章中保留了对这些基本知识的覆盖，并通过新的例题和扩展讨论对其进行了增强。在一些章的后几节中，会涉及一些像量化噪声这样的内容，这就要求有随机信号方面的基础知识。在第 2 章和附录 A 中都对此进行了简单介绍。

过去 10 年间，在 DSP 教学中发生了一个重大变革，那就是广泛使用了诸如 MATLAB、LabVIEW 和 Mathematica 等复杂的软件包，为学生们提供了具有强交互性的亲手操作的经历。这些软件包使用起来方便简单，让我们有机会将离散时间信号处理中的基本概念和数学公式与涉及实信号和实时系统的实际应用联系起来。这些软件包有完备的说明文档、良好的技术支持和友好的用户界面，这些都使学生能够在不分心于对软件基础结构的深入研究和理解的基础上来方便地使用它们。现在，在许多信号处理课程中都普遍包含利用一个或多个软件包实现的工程作业和练习题。当然，为了能够对学生的学学习最有益，需要对这些课题和题目进行仔细地设计，应该强调基于概念、参数等内容的实验，而不是简单地照着书本操练。令人特别振奋的是，只要安装上这样一款强大的软件包，每个学生的笔记本电脑都会成为一个能够对离散时间信号处理概念和系统进行实验的新型实验室。

作为教师，我们一贯坚持寻找最好的方式，从而利用计算机资源改善学生的学习环境。我们仍然坚信教科书是在形式上最方便而且稳定的封装知识的最好方法。教科书的发展演进应该是相对缓慢的，这样才能保证一定程度上的稳定，并让学生有时间来归纳整个技术领域的发展并检验提出新想法的方法。而另一方面，计算机软件和硬件技术的发展变化快得多，软件更新通常半年一次，而硬件的速度仍然每年都在提高。这些情况以及万维网的使用，让我们可以对学习环境中的交互和实验部分进行更频繁的更新。正是由于这些原因，一种很自然的讲授方式是利用不同的平台环境，一方面在教科书中陈述基本的数学公式和概念，而另一方面通过网站来呈现需要亲身经历的交互实验。

基于以上这些想法，我们完成了 *Discrete-Time Signal Processing, Third Edition*，其中包括我们认为的离散时间信号处理领域中的基本数学知识和概念，还包括一个配套网站，该网站是由

Rose-Hulman 技术学院的同事 Mark Yoder 和 Wayne Padgett 开发的, 网站提供了各种交互的用于学习的软件资源, 可以巩固和扩大书本的影响。前言之后的小节中会更详细地描述这个网站。设计的网站可以动态地持续更新, 以快速呈现本书作者和网站作者开发的新资源。该网站能够快速反映不断变化的硬软件环境, 这些环境提供了对主要概念和基于实信号处理问题实验的可视化平台。我们惊叹于该配套网站环境的无穷潜力, 它极大地提高了我们在离散时间信号处理课程上的教学能力及学生的学习能力。

本书在材料的组织上为大学本科生和研究生的使用都提供了相当大的灵活性。典型的供本科生一学期用的选修课可以覆盖第 2 章的 2.0 节至 2.9 节, 第 3 章, 第 4 章的 4.0 节至 4.6 节, 第 5 章的 5.0 节至 5.3 节, 第 6 章的 6.0 节至 6.5 节, 第 7 章的 7.0 节至 7.3 节 (及 7.4 节和 7.5 节的简单介绍)。如果学生在一般的信号与系统课程中已学过离散时间信号与系统, 则可以很快地掠过第 2 章至第 4 章, 而留出充裕的时间来学习第 8 章。作为一年级研究生或本科高年级选修课, 除了上述内容外, 还可以包括第 5 章余下的部分, 4.7 节有关多采样率信号处理的讨论, 4.8 节有关量化问题的简单介绍, 还可以包括 4.9 节讨论的有关在 A/D 和 D/A 转换器中噪声形成的介绍。一年级研究生课还应该包括 6.6 节至 6.9 节讨论的量化问题, 7.7 节至 7.9 节讨论的最优 FIR 滤波器问题, 以及第 8 章的所有离散傅里叶变换和第 9 章的利用 FFT 的离散傅里叶变换的计算等内容。第 10 章的很多例子能有效地加强对 DFT 的讨论。在两学期的研究生课中, 除了应包括本书所有内容外, 还可以包括其他一些更先进的专题。在所有这些章节中, 每一章后面的作业题都能在借助或不借助计算机的情况下完成。另外, 为了加强信号处理系统理论和计算机实现之间的联系, 我们可以借助网站上列出的一些习题和作业。

下面总结了各章的内容, 重点强调了第三版的主要变化。

第 2 章介绍了离散时间信号与系统的基本类型, 并定义了系统的基本性质, 诸如线性、时不变性、稳定性和因果性等。本书主要关注线性时不变系统, 这是因为有许多成熟的方法可以用于这类系统的分析与设计。尤其是在这一章中, 通过卷积和建立了线性时不变系统的时域表示法, 并讨论了由线性常系数差分方程描述的一类线性时不变系统。第 6 章还将更详细地论述此类系统。第 2 章还通过离散时间傅里叶变换引入了离散时间信号与系统的频域表示法。第 2 章的重点是利用离散时间傅里叶变换来表示序列, 也就是把序列表示为一组复指数的线性组合, 以及离散时间傅里叶变换基本性质的建立。

在第 3 章中, 作为傅里叶变换的推广建立了 z 变换。这一章的重点在于 z 变换的基本定理和性质, 以及逆变换运算的部分分式展开法。第三版中新增了关于单边 z 变换的小节。第 5 章将广泛深入地讨论如何利用第 2 章和第 3 章中所得的结果来表示和分析线性时不变系统。虽然对许多学生来说, 第 2 章和第 3 章中的内容是重新复习, 但大部分介绍性的信号与系统课程的深度或广度都不及这两章所涵盖的内容。另外, 这些章节还给出了全书将要用到的符号注释。因此, 我们建议学生应当认真学习第 2 章和第 3 章的内容, 从而可以建立起掌握离散时间信号与系统基础知识的信心。

在离散时间信号是通过连续时间信号周期采样而得到的情况下, 第 4 章详细讨论了这两类信号之间的关系, 其中包括奈奎斯特采样定理。另外, 还讨论了离散时间信号增采样和减采样, 这些在多采样率信号处理系统和采样率转换中都会用到。这一章以在从连续时间到离散时间转换

时所遇到的某些实际问题的讨论作为结束，其中包括为避免混叠而采用的预滤波，当离散时间信号用数字表示时的幅量化效应的建模，以及在简化模数 (A/D) 和数模 (D/A) 转换过程中利用过采样的问题等。第三版中增加了新的量化噪声仿真的例子，增加了基于样条推导内插滤波器的讨论，增加了多级内插和双通道多采样率滤波器组的讨论。

在第5章中，利用了在前面各章中建立的概念，详细地研究线性时不变系统的各种性质。定义了一类理想频率选择性滤波器，并对由线性常系数差分方程所描述的系统建立了系统函数和零-极点表示法，而该类系统的实现将在第6章中详细讨论。同时，在第5章还定义并讨论了群延迟、相位响应和相位失真，以及系统的幅度响应和相位响应之间的关系，其中包括对最小相位、全通和广义线性相位系统等的讨论。第三版的变化在于增加了一个群时延和衰减的例子，这个例子的交互性实验在网页上可以找到。

第6章重点讨论了由线性常系数差分方程描述的系统，并用方框图和线性信号流图来表示这类系统。本章的大部分内容是建立各种重要的系统结构，并比较它们之间的一些性质。这些讨论和各种滤波器结构的重要性都基于这样一个事实：在离散时间系统的具体实现中，系数的不准确性和运算误差的影响，都与所采用的具体结构密切相关。无论对于数字还是离散时间模拟实现，这些基本问题都是类似的。本章在数字实现的范畴内，通过对数字滤波器的系数量化和运算舍入噪声影响的讨论来阐明这些问题。本章新增了一个小节，详细讨论了利用有限脉冲响应 (FIR) 和无限脉冲响应 (IIR) 格型滤波器实现线性常系数差分方程。正如在第6章及第11章中所讨论的，这种滤波器结构由于具有期望的性质，已经在许多应用中占据了重要地位。很多教科书和文献中讨论格型滤波器时，通常都会将其重要性与此类滤波器在线性预测分析及信号建模中的作用紧密联系起来。然而，应用 FIR 和 IIR 滤波器格型实现结构的重要性与待实现的差分方程是如何得到的，并没有关系。例如，差分方程可能是利用第7章讨论的滤波器设计技术设计的，但我们会采用第11章讨论的参数信号建模或其他各种可实现差分方程的方法来实现它。

第6章主要关注的是线性常系数差分方程的表示和实现，而第7章则讨论为了逼近某一期望的系统响应而获得这类差分方程系数的步骤，其设计方法分为无限脉冲响应 (IIR) 滤波器设计和有限脉冲响应 (FIR) 滤波器设计两大类。新增加的 IIR 滤波器设计实例对不同逼近方法的性质进行了深入探讨。内插滤波器设计的新例子给出了一种在实际环境中比较 IIR 和 FIR 滤波器的框架。

在连续时间线性系统理论中，傅里叶变换主要是作为表示信号与系统的一种分析工具。与此对照，在离散时间情况下，很多信号处理系统和算法则涉及直接计算傅里叶变换。尽管傅里叶变换本身是不能计算的，但它的采样形式，即离散傅里叶变换 (DFT) 却是可以计算出来的，并且对有限长信号来说，其 DFT 就是该信号的完全傅里叶表示。第8章详细讨论了离散傅里叶变换及其性质，以及它与离散时间傅里叶变换 (DTFT) 的关系。这一章还将介绍离散余弦变换 (DCT)，这一变换在诸如音频和视频压缩的应用中起着非常重要的作用。

第9章将介绍并讨论许多重要的用于计算或产生离散傅里叶变换的各种算法，其中包括 Goertzel 算法、快速傅里叶变换 (FFT) 算法，以及线性调频 (鸟声) 变换算法等。在第三版中，利用第4章讨论的基本增采样和减采样操作，增加了对 FFT 算法推导的深入分析。这一章还将讨论，随着技术的演进，评估信号处理算法效率的重要指标发生着极大的改变。在20世纪70年代

(我们第一本书产生的时代), 存储和算术计算(乘法及浮点加法)的成本很高, 此时算法效率通常是用对这些资源的需求量来判断的。而如今, 通过增大存储量来提高信号处理算法的速度并降低实现所需的功率, 已是司空见惯的事。类似地, 一些教科书中指出了在多核平台上适于算法的并行实现(虽然可能会增大计算开销)。现在, 数据交换的周期数、片上通信及所需功率, 成为算法实现结构选取的关键度量。正如第9章所讨论的, 虽然从所需乘法次数的角度来说, FFT的效率比Goertzel算法或DFT直接实现更高, 但如果主要衡量指标是通信周期数, 则FFT的效率更低, 因为直接实现或Goertzel算法的并行化程度比FFT高。

有了前面这几章, 特别是第2章和第3章、第5章和第8章的背景知识, 第10章中重点讨论了如何利用DFT对信号进行傅里叶分析。如果没有对前面所涉及到的问题, 以及对连续时间傅里叶变换、DTFT和DFT之间的关系的透彻理解, 利用DFT对一个实际信号进行分析时往往会导致混淆和曲解。第10章将会提到许多这样的问题。关于利用依时傅里叶变换对具有时变特性的信号进行傅里叶分析的问题也将做适当的讨论。第三版中的新内容是对滤波器组分析进行了更详细的讨论, 包括MPEG滤波器组的举例说明、新的说明窗长影响的鸟声信号依时傅里叶分析举例, 以及关于量化噪声分析的更详细的仿真。

第11章是全新的一章, 其主题是参数信号建模。本章从把信号表示成一个LTI系统输出的基本概念入手, 给出了如何通过求解一组线性方程来得到信号模型各参数的过程。讨论了方程建立和求解所涉及的计算细节, 并通过举例来说明。特别强调了Levinson-Durbin求解算法及其许多性质, 这些性质可以很容易地从类似格型滤波器内插的算法细节中推导出来。

第12章关注离散希尔伯特(Hilbert)变换。这种变换出现在各种不同的实际应用中, 其中包括逆滤波、实带通信号的复数表示、单边带调制技术及其他许多方面。随着日益复杂的通信系统的出现, 以及宽带和多带连续时间信号高效采样方法的日益丰富, 对希尔伯特变换的根本性理解也变得越来越重要。希尔伯特变换在第13章的倒谱讨论中也具有重要作用。

在1975年我们出版的第一本书和1989年出版的本书的第一版中, 包括了对一类非线性技术的详细阐述, 这类技术称为倒谱分析和同态解卷积。如今这些技术已经变得越来越重要, 在包括语音编码、语音及说话人识别、地球物理分析和医学成像数据在内的应用中被广泛采用。同时, 在其他许多应用中, 解卷积也成为一个重要理论。正因为如此, 第三版中重新引入了这些专题, 并扩充了讨论和举例。本章包括了对倒谱定义和性质的详细讨论, 以及计算倒谱的各种方法, 涵盖了利用多项式求根作为倒谱计算基础的一些新的结果。第13章中的内容展示, 还给读者提供了机会, 使其对前面各章中的基础知识及日益重要的一系列非线性信号分析技术有全新的理解, 也使得对这些非线性技术可以像对线性技术那样进行各种丰富多彩的分析。本章还包括了几个新例子, 对在解卷积中采用同态滤波技术进行了说明。

我们期盼着在教学中使用这个新版教材, 并希望我们的同行和学生们可以从这些相较于之前版本有所增强的内容中获益。总之, 信号处理, 尤其是离散时间信号处理在其各个方面都有丰富的内容, 甚至还会出现更加令人振奋的进一步发展。

Alan V. Oppenheim
Ronald W. Schaffer

THE COMPANION WEBSITE

A companion website has been developed for this text by Mark A. Yoder and Wayne T. Padgett of Rose-Hulman Institute of Technology and is accessible at www.pearsonhighered.com/oppenheim. This web companion, which will continuously evolve, is designed to reinforce and enhance the material presented in the textbook by providing visualizations of important concepts and a framework for obtaining “hands-on” experience with using the concepts. It contains six primary elements: *Live Figures*, *Build-a-Figures*, *MATLAB-based homework problems*, *MATLAB-based projects*, *Demos*, and additional *Traditional Homework Problems*, each tying into specific sections and pages in the book.

Live Figures

The Live Figures element reinforces concepts in the text by presenting “live” versions of select figures. With these, the reader is able to interactively investigate how parameters and concepts interoperate using graphics and audio. Live Figures were created with NI LabVIEW signal processing tools. The following three examples provide a glimpse of what is available with this element of the website:

Figure 2.10(a)-(c) in Section 2.3 on page 28 shows the graphical method for computing a discrete-convolution with the result shown in Figure 2.10(d). The corresponding Live Figure allows the user to choose the input signals and manually slide the flipped input signal past the impulse response and see the result being calculated and plotted. Users can quickly explore many different configurations and quickly understand how graphical convolution is applied.

Figure 4.73 on page 231 of Section 4.9.2 shows the power spectral density of the quantization noise and signal after noise shaping. The Live Figure shows the spectrum of the noise and signal as a live audio file plays. The reader can see and hear the noise

as the noise shaping is enabled or disabled and as a lowpass filter is applied to remove the noise.

Figure 5.5(a) on page 282 of Section 5.1.2 shows three pulses, each of a different frequency, which enter an LTI system. Figure 5.6 on page 283 shows the output of the LTI system. The associated Live Figure allows students to experiment with the location of the poles and zeros in the system as well as the amplitude, frequency, and position of the pulses to see the effect on the output. These are just three examples of the many web-based Live Figures accessible on the companion website.

Build-a-Figure

The Build-a-Figure element extends the concept of the Live Figure element. It guides the student in recreating selected figures from the text using MATLAB to reinforce the understanding of the basic concepts. Build-a-Figures are not simply step-by-step recipes for constructing a figure. Rather, they assume a basic understanding of MATLAB and introduce new MATLAB commands and techniques as they are needed to create the figures. This not only further reinforces signal processing concepts, but also develops MATLAB skills in the context of signal processing. As an example, Figures 2.3 and 2.5 on pages 12 and 16 in Section 2.1 of the text are plots of several sequences. The corresponding Build-a-Figures introduce the MATLAB plot command techniques for labeling plots, incorporating Greek characters, and including a legend. Later Build-a-Figures use this knowledge as needed in creating plots. The Noise Shaping and Group Delay Build-a-Figures (Figure 4.73, page 231 and Figure 5.5, page 282) have instructions for recreating the Live Figures discussed above. Rather than giving step-by-step instructions, they introduce new MATLAB commands and suggest approaches for recreating the figures with considerable latitude for experimentation.

MATLAB Homework Problems

Through the MATLAB Homework Problems element, the companion website provides a primary mechanism for combining MATLAB with homework exercises. One aspect of this is the use of homework to practice using MATLAB somewhat in the style of Build-a-Figures. These exercises are much like non-MATLAB exercises but with MATLAB used to facilitate certain parts, such as in plotting results. The second avenue is the use of MATLAB to explore and solve problems that cannot be done by mathematical analysis. The MATLAB problems are all classroom tested and tend to be short exercises, comparable to the Basic Problems in the textbook, in which the user is asked to complete straightforward signal processing tasks using MATLAB. These problems are modest in scope as would be typical of one of several problems in a weekly homework assignment. Some problems are directly linked to analytic problems in the text, while others will stand on their own. Many of the problems blend analytic solutions with MATLAB, emphasizing the complementary value of each approach.

MATLAB-Based Projects

The MATLAB-based Projects element contains longer and more sophisticated projects or exercises than the homework problems. The projects explore important concepts from the textbook in greater depth and are relatively extensive. Projects are linked to sections of the text and can be used once that section is understood. For example, the first project is somewhat tutorial in nature and can be used at any stage. It introduces MATLAB and shows how it is used to create and manipulate discrete-time signals and systems. It assumes that the students have some programming experience, but not necessarily in MATLAB. Many of the other projects require some filter design techniques and therefore tie in with Chapter 7 (Filter Design Techniques) or later. They explore topics such as FIR and IIR filter design, filter design for sample rate conversion, testing a "Folk Theorem" about humans not being able to hear phase in a signal, enhancing speech by removing noise, hardware considerations for removing noise, spectral estimation and more. All have been classroom tested and some have led to student publications.

Demos

The Demos are interactive demonstrations that relate to specific chapters. Unlike the Live Figures, they do not tie directly to a given figure. Rather, they illustrate a bigger idea that the student can understand after completing the chapter. For example, one demo shows the importance of using a linear-phase filter when it is essential to preserve the shape of a bandlimited pulse.

Additional Traditional Homework Problems

A sixth important component of the website is a collection of problems that were removed from the second edition to make room for new problems. These problems can be used to supplement the problems in the text. Each of these problems is given in .pdf and .tex form along with any figures needed to create the problem.

In summary, the companion web site is a rich set of resources which are closely tied to the textbook. The resources range from the Live Figures which reinforce new concepts to the MATLAB-based projects which challenge the students to go beyond the textbook to explore new ideas. This website will continuously evolve as new teaching resources are developed by the authors of the text and by the website authors, Mark Yoder and Wayne Padgett.

Pearson offers many different products around the world to facilitate learning. In countries outside the United States, some products and services related to this textbook may not be available due to copyright and/or permissions restrictions. If you have questions, you can contact your local office by visiting www.pearsonhighered.com/international or you can contact your local Pearson representative.

ACKNOWLEDGMENTS

This third edition of *Discrete-Time Signal Processing* has evolved from the first two editions (1989, 1999) which originated from our first book *Digital Signal Processing* (1975). The influence and impact of the many colleagues, students and friends who have assisted, supported and contributed to those earlier works remain evident in this new edition and we would like to express again our deep appreciation to all whom we have acknowledged more explicitly in those previous editions.

Throughout our careers we both have had the good fortune of having extraordinary mentors. We would each like to acknowledge several who have had such a major impact on our lives and careers.

Al Oppenheim was profoundly guided and influenced as a graduate student and throughout his career by Professor Amar Bose, Professor Thomas Stockham, and Dr. Ben Gold. As a teaching assistant for several years with and as a doctoral student supervised by Professor Bose, Al was significantly influenced by the inspirational teaching, creative research style and extraordinary standards which are characteristic of Professor Bose in everything that he does. Early in his career Al Oppenheim was also extremely fortunate to develop a close collaboration and friendship with both Dr. Ben Gold and Professor Thomas Stockham. The incredible encouragement and role model provided by Ben was significant in shaping Al's style of mentoring and research. Tom Stockham also provided significant mentoring, support and encouragement as well as ongoing friendship and another wonderful role model. The influence of these extraordinary mentors flows throughout this book.

Most notable among the many teachers and mentors who have influenced Ron Schafer are Professor Levi T. Wilson, Professor Thomas Stockham, and Dr. James L. Flanagan. Professor Wilson introduced a naive small town boy to the wonders of mathematics and science in a way that was memorable and life changing. His dedication to teaching was an inspiration too strong to resist. Professor Stockham was a great teacher,

a friend at a crucial time, a valued colleague, and a wonderfully creative engineer. Jim Flanagan is a giant in the area of speech science and engineering and an inspiration to all who are so lucky as to have worked with him. Not all great teachers carry the title “Professor”. He taught Ron and many others the value of careful thought, the value of dedication to a field of learning, and the value of clear and lucid writing and expression. Ron Schafer freely admits appropriating many habits of thought and expression from these great mentors, and does so with confidence that they don’t mind at all.

Throughout our academic careers, MIT and Georgia Tech have provided us with a stimulating environment for research and teaching and have provided both encouragement and support for this evolving project. Since 1977 Al Oppenheim has spent several sabbaticals and almost every summer at the Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) and he is deeply appreciative of this special opportunity and association. It was during those periods and in the wonderful WHOI environment that much of the writing of the various editions of this book were carried out.

AT MIT and at Georgia Tech we have both received generous financial support from a number of sources. Al Oppenheim is extremely grateful for the support from Mr. Ray Stata and Analog Devices, Inc., the Bose Foundation, and the Ford Foundation for the funding of research and teaching at MIT in various forms. Both of us have also enjoyed the support of Texas Instruments, Inc. for our teaching and research activities. In particular, Gene Frantz at TI has been a dedicated supporter of our work and DSP education in general at both academic institutions. Ron Schafer is also grateful for the generous support from the John and Mary Franklin Foundation, which funded the John and Marilu McCarty Chair at Georgia Tech. Demetrius Paris, long time director of the School of ECE at Georgia Tech, and W. Kelly Mosley and Marilu McCarty of the Franklin Foundation, deserve special thanks for their friendship and support for over 30 years. Ron Schafer is appreciative of the opportunity to be a part of the research team at Hewlett-Packard Laboratories, first through research support at Georgia Tech over many years, and since 2004, as an HP Fellow. The third edition could not have been completed without the encouragement and support of HP Labs managers Fred Kitson, Susie Wee, and John Apostolopoulos.

Our association with Prentice Hall Inc. began several decades ago with our first book published in 1975 and has continued through all three editions of this book as well as with other books. We feel extremely fortunate to have worked with Prentice Hall. The encouragement and support provided by Marcia Horton and Tom Robbins through this and many other writing projects and by Michael McDonald, Andrew Gilfillan, Scott Disanno, and Clare Romeo with this edition have significantly enhanced the enjoyment of writing and completing this project.

As with the previous editions, in producing this third edition, we were fortunate to receive the help of many colleagues, students, and friends. We greatly appreciate their generosity in devoting their time to help us with this project. In particular we express our thanks and appreciation to:

Professor John Buck for his significant role in the preparation of the second edition and his continued time and effort during the life of that edition,

Professors Vivek Goyal, Jae Lim, Gregory Wornell, Victor Zue and Drs. Babak Ayazifar, Soosan Beheshti, and Charles Rohrs who have taught at MIT from various editions and have made many helpful comments and suggestions,

Professors Tom Barnwell, Russ Mersereau, and Jim McClellan, long-time friends and colleagues of Ron Schafer, who have taught frequently from various editions and have influenced many aspects of the book,

Professor Bruce Black of Rose-Hulman Institute of Technology for carefully organizing ten years worth of new problems, selecting the best of these, and updating and integrating them into the chapters,

Professor Mark Yoder and Professor Wayne Padgett for the development of an outstanding companion web site for this edition,

Ballard Blair for his assistance in updating the bibliography,

Eric Strattman, Darla Secor, Diane Wheeler, Stacy Schultz, Kay Gilstrap, and Charlotte Doughty for their administrative assistance in the preparation of this revision and continued support of our teaching activities,

Tom Baran for his help with many of the computer issues associated with managing the files for this edition and for his significant help with the examples in a number of the chapters,

Shay Maymon who meticulously read through most of the chapters, reworked many of the problems in the more advanced chapters, and made important corrections and suggestions,

To all who helped in careful reviewing of the manuscript and page proofs: Berkin Bilgic, Albert Chang, Myung Jin Choi, Majid Fozunbal, Reeve Ingle, Jeremy Leow, Ying Liu, Paul Ryu, Sanquan Song, Dennis Wei, and Zahi Karam.

And to the many teaching assistants who have influenced this edition directly or indirectly while working with us in teaching the subject at MIT and at Georgia Tech.