

国外电子与通信教材系列

PEARSON

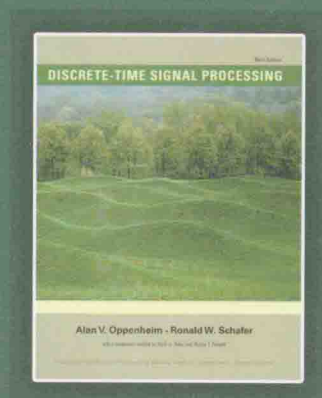
奥本海姆

Discrete-Time Signal Processing, Third Edition

# 离散时间信号处理 (第三版)

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

黄建国 刘树棠 张国梅 译



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)

**Discrete-Time Signal Processing**

Third Edition

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

黄建国 刘树棠 张国梅 译

電子工業出版社

**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, 连续时间信号的采样, 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, 倒谱分析与同态解卷积。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。

Authorized transition from the English language edition, entitled Discrete-Time Signal Processing, Third Edition, 9780131988422 by Alan V. Oppenheim, Ronald W. Schaffer published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2010 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.

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PEARSON EDUCATION ASIA LTD., and PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY Copyright © 2015.

本书中文简体版专有出版权由 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: 01-2009-7049

### 图书在版编目 (CIP) 数据

离散时间信号处理: 第3版 / (美) 奥本海姆 (Oppenheim, A. V.) 等著; 黄建国, 刘树棠, 张国梅译. 北京: 电子工业出版社, 2015. 1

书名原文: Discrete-Time Signal Processing, Third Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-24466-7

I. ①离… II. ①奥… ②黄… ③刘… ④张… III. ①离散信号-时间信号-信号处理-高等学校-教材 IV. ①TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 230406 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 张小乐

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

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 × 1092 1/16 印张: 50 字数: 1378 千字

版 次: 2015 年 1 月第 1 版 (原著第 3 版)

印 次: 2015 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 109.00 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 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。

# 译 者 序

数字信号处理的理论和方法在近半个多世纪经历了建立、兴起、快速发展和广泛应用的成长历程,目前信号处理已发展成为一门内涵十分丰富的独立学科,成为信息科学的重要组成部分。与之相适应的数字信号处理理论和方法在各大大学所开设的课程也随之同步发展。由美国麻省理工学院 A. V. 奥本海姆和佐治亚理工学院 R. W. 谢弗教授撰写的信号处理教材充分反映了这一历程。早在 20 世纪 70 年代数字信号处理技术发展之初,为适应部分学校研究生教学的需要,奥本海姆和谢弗教授就撰写了 *Digital Signal Processing* 一书,于 1975 年出版。其后十多年间,随着计算机和 DSP 芯片技术的快速发展,数字信号处理的应用领域迅速扩大,许多院校在本科高年级就开设了该类课程,两位教授认为有必要撰写一部面向本科高年级学生的教材,并将教材内容重点放在离散时间信号处理上,因为它是数字信号处理的核心和基础。于是,在 1989 年他们撰写并出版了《离散时间信号处理(第一版)》。时隔十年时间,作者根据数字信号处理的发展及第一版的教学反馈,于 1999 年修订出版了《离散时间信号处理(第二版)》,调整并补充完善了章节内容,去掉了有关倒谱和同态滤波的论述,尤其是充实了习题的内容和数量。进入 21 世纪,经历了近十年数字信号处理及应用的快速发展,作者认真总结信号处理理论方法的新进展和广泛应用的需求,以及教学实践的经验,于 2009 年修订出版了《离散时间信号处理(第三版)》,使得该书更加精炼和经典。

本书第三版在第二版的基础上做了进一步的提炼和完善,其特色和变化主要体现在以下几个方面:1) 主导思想。随着计算机技术和微电子器件日新月异的突飞猛进,数字信号处理受到人们的格外重视,其应用范围迅速扩大,几乎涵盖了当前各主要领域。面对这一快速发展的形势,本书不是企图去“涵盖”学科各个方面,而是力图去“揭示”它的核心内涵,并使读者易于理解,使其具有较长的生命力。2) 内容调整。全书定位面向大学本科生和一年级研究生,内容讲述具有广泛应用前景的基本原理。考虑到参数模型方法和倒谱方法在越来越多的领域得到应用,在第三版中增加了一章介绍信号的参数模型方法,重点论述全极点参数模型的特性及实现,书中还恢复了在第一版中曾论述过的有关倒谱的内容,并增加了加深理解的讨论和示例。其余各章均做了进一步的提炼和完善,尤其是增加了 130 多道精选的示例和习题,使习题总数达到 700 多道,进一步发展了本书的传统特色。3) 教辅工具。在书本之外,建立开发了一个辅助本书教学的网站,网站内容丰富,并有 MATLAB、LabVIEW 和 Mathematica 等相关软件支撑,将抽象的概念和实际信号处理问题的实验可视化,一方面帮助学生加深对基本概念和方法的理解,为学生提供一个学习和实践离散时间信号处理理论方法的平台;另一方面为教师进一步提高教学效果创造了良好环境。

本书第三版的内容经典而丰富,面向不同的专业方向,以及高年级本科生或一年级研究生的不同程度需求,作者提出了可不同取材、进行不同组合教学的建议。本书第一、二版被广泛使用,受到普遍欢迎。相信第三版的出版,将会在加深对核心概念的理解,培养触类旁通的创新思维,提升学以致用用的实践能力方面向前更跨进一步,对推动数字信号处理的教学和应用发挥重要作用。

本书第 1 章至第 6 章由刘树棠翻译,第 11 章由张国梅翻译。除此以外,张国梅还帮助完成了

前6章中新增内容的翻译和译稿整理工作,以及“前言”、“配套网站”和“致谢”等的译文工作。第7章至第10章、第12章、第13章及附录由黄建国翻译。黄建国的研究生卫哲和罗宇参与部分翻译和译稿的整理工作。全书由刘树棠负责统稿。西北工业大学张群飞教授给予翻译工作很大支持,译者对此表示诚挚的感谢。感谢电子工业出版社马岚同志在出版和编辑过程中所给予的支持、关心和帮助。最后,对我们的家人孙漪和郑家梅同志所给予的关心和支持,再一次表示深深的愧疚和衷心的感谢。

刘树棠 于西安交通大学

黄建国 于西北工业大学

# 前 言

本书是我们于1975年出版的 *Digital Signal Processing* 一书的延续。那本非常成功的教科书出现在该技术领域还不成熟,刚刚开始进入快速发展的时期。在当时,这个主题只在研究生阶段和极少数学校里被讲授。1975版的这本书正是专门为这类课程写就的。目前,它仍旧在印刷并依然在美国本土和国际上许多学校被成功地使用。

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70年代就已显露出的巨大潜力。数字信号处理(DSP)所萌发出的重要性清楚地表明对原书进行修订和更新内容是势在必行的。在筹划修订本时,由于在技术领域以及相关课程的讲授水平和风格上都已经出现了很多变化,很显然最合适的是在原书的基础之上重写一本新书,而同时又让原书仍然可以继续出售。我们将那本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,或者是模拟的,或者是数字的。

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,但更为普遍的是在第3学年和第4学年稍微高深一些的水平上讲授,或者作为最初的研究生专题课来讲授。因此,在处理像线性系统、采样、多采样率信号处理、应用以及谱分析这样一些方面的内容时进行大幅度扩展是合适的。另外,还用更多的例题来强调和说明一些重要概念。我们始终把精心构造的例题和课后作业题放在重要的地位,所以这本新书包含了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,虽然在突出的重点上,理解上和教学方法上做了一些垂炼。因此第二版 *Discrete-Time Signal Processing* 于1999年出版了。那个新版本是重要的修订本,目的就是要让离散时间信号处理这一学科对于大学生和实践工程师们来说都更加容易理解和接受,而没有在基本内容范围上做过多考虑。

第三版 *Discrete-Time Signal Processing* 是对第二版的重要修订。这个新版本对于大学和一年级研究生阶段的课程讲授方法的改变以及典型课程范围的变化做出了响应。它继承了重视学生和实践工程师们对于专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结合并扩充了一些更为前沿的主题以及为了在该领域有效开展工作所必不可少的认识。第二版中的每个章节都进行了重要的审查和修改,并加入了一个全新的章节,还有一个章节被重新编入并在第一版基础上做了重大更新。伴随第三版的问世,Rose-Hulman技术学院的Mark Yoder教授和Wayne Padgett教授也开发完成了一个交互性较好的配套网站。后面的“配套网站”说明给出了关于网站更加全面的讨论。

自第二版以来,我们已经持续教授这门课程超过了10年,自然也为作业布置和测验创造出了一些新的题目。我们总是把精心构造的例题和课后作业题放在重要的地位,所以在第三版中包含了我们从这些题目中精选出的最好的130道题目,现在整本书的作业题总数超过了700道。在第二版中有的但未出现在第三版中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

些了解,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的课程安排中都是会有的。同时,在大多数大学本科课程中包含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,现在也是很普遍的。

我们在大学本科高年级和研究生中讲授离散时间信号处理的经验告诉我们,从对这些主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课本的统一符号框架的熟悉,发展到可以探讨更高深的主题。在大学本科低年级课程中关于离散时间信号处理的初步介绍,最通常的是让学生去学习解决许多数学变换问题,但在重新整理这些问题时,我们想让学生尝试对一些基本概念做更深入的推理。因此,在这一版的前五章中,我们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。在一些章的后面几节中,会涉及一些像量化噪声之类的内容,这就要求有随机信号方面的基础知识。在第2章和附录A中都将对此做了简单介绍。

过去十年间在DSP教学中发生了一个重大变革,那就是广泛地使用了类似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经验。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,这些都使得学生们可以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有利用一个或多个软件包实现的工程课题和练习题。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的设计,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能变成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我们学生的学习环境。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,并让学生们有时间来归纳整个技术领域的发展以及验证提出新思想的方法。而另一方面,计算机软件和硬件技术的发展变化要快得多,软件更新通常半年一次,而硬件速度仍然每年都在提高。这些连同世界范围的网站的使用,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*第三版,这里结合了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,以及一个配套网站,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。在“配套网站”中会更详细地描述这个网站。设计的网站可以动态地连续更新,以快速地呈现本书作者和网站作者开发出来的新资源。该网站对于不断变化的硬软件环境敏锐,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题上的教学能力以及学生的学习能力。

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。典型地供大学本科生一学期用的选修课可以覆盖第2章2.0节~2.9节;第3章;第4章4.0节~4.6节;第5章5.0节~5.3节;第6章6.0节~6.5节;第7章7.0节~7.3节以及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、第3



章和第4章,而留出富裕的时间来学习第8章。作为一年级研究生或高年级选修课程,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,或许还可以包括在4.9节讨论的有关在数模和模数转换器中噪声形成的介绍。一年级的研究生课程还应该包括在6.6节~6.9节所讨论的量化问题,7.7节~7.9节最优FIR滤波器的讨论,以及第8章全部离散傅里叶变换和第9章利用FFT的离散傅里叶变换的计算等内容。在第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,除了应包括本书的全部内容外,还可以包括另外一些的更高深的主题。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来完成。另外,为了加强有关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工程课题。

最后我们将对各章内容做个总结,重点突出第三版的主要变化。

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。本书的主要着眼点放在线性时不变系统上,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所描述的一类线性时不变系统。在第6章还将对该类系统做更详细地论述。在第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章重点放在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,并建立在离散时间傅里叶变换的基本性质上。

在第3章,作为傅里叶变换的推广建立了 $z$ 变换。这一章重点放在 $z$ 变换的基本定理和性质上,以及对逆变换运算的部分分式展开法上。在新版中新增加了关于单边 $z$ 变换小节。第5章将广泛深入地讨论如何利用在第2章和第3章得到的结果来表示和分析线性时不变系统。虽然对许多同学来说,第2章和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来学习第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中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幅度量化效应的建模,以及在简化模数和数模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。

第5章利用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。我们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章详细讨论。同时,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配套网站上可以找到。

第6章集中讨论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。本章是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的。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章及稍后的第11章中所讨论的,这种滤波器结构由于具有理想的性质已经在许多应用中占有重要地位。很多教材和论文在讨论格型滤波器时,通常都会紧密地结合这类滤波器在线性预测分析以及信号建模中的重要性。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无关。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得到的,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做了深入探讨。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要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章详细讨论离散傅里叶变换及其性质,以及它与离散时间傅里叶变换的关系。这一章还将介绍离散余弦变换(DCT),这一变换在类似音频和视频压缩的应用中起着非常重要的作用。

第9章将介绍并讨论用于计算或产生离散傅里叶变换的各种重要算法,其中包括Goertzel算法、快速傅里叶变换(FFT)算法和线性调频(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。在这一章中还将讨论,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(乘法以及浮点加法)的成本高,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是司空见惯的事。类似地,一些教材中指出在多核平台上适于算法的并行实现,即使可能会增大计算开销。现在,数据交换的周期数、片上通信以及所需功率,成为算法实现结构选取的关键度量。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、第3章、第5章和第8章的背景,第10章集中讨论如何利用DFT对信号进行傅里叶分析。如果没有对前面所涉及的问题,以及对连续时间傅里叶变换、DTFT和DFT之间的关系有一个透彻的理解,那么利用DFT对一个实际信号进行分析时往往会导致混淆和曲解。在第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进行适当的讨论。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、单边带调制技术和许多其他的方面。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以及 1989 年出版的本书的第一个版本中,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,同时其他的许多应用中解卷积也成为了一个重要理论。正因为如此,在这一版中我们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底的一些新的结论。利用第 13 章中内容,读者还可对之前各章节中以及日益重要的一系列介绍非线性信号分析技术的教材中给出的基础知识进行全新的理解,同时也使得利用这些非线性技术本身可以像利用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的例子,对在解卷积中采用同态滤波技术进行说明。

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。普遍意义上的信号处理和具体的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

# 配套网站

Rose-Hulman 技术学院的 Mark A. Yoder 和 Wayne T. Padgett 为本书开发了一个配套网站,其网址是 [www.pearsonhighered.com/oppenheim](http://www.pearsonhighered.com/oppenheim)。该网站的目的是要对本书的内容进行增强和补充,提供了一些重要概念的可视化解释以及利用这些概念进行实践的操作环境,网站处于不断更新中。网站包括六个主要部分:活动图形,图形建立,基于 MATLAB 的课后作业,基于 MATLAB 的工程课题,演示以及补充的典型习题,每项内容都与书中的具体章节相对应。

## 活动图形

活动图形部分通过给出所选图形的“活动”版本来增强对书中概念的解释。利用这些图形,读者可以交互式地来研究如何利用图片和音频实现参数和概念的配合工作。活动图形部分是利用 NI 的 LabVIEW 信号处理工具开发的。以下列出的三个例子简单展示了利用网站提供的活动图形部分可以做什么。

2.3 节中给出的图 2.10(a)至图 2.10(c)展示了利用图 2.10(d)中的结果进行离散卷积计算的图形方法。活动图形工具允许读者对输入信号进行选择,并手动地将反转的输入信号滑动到单位脉冲响应之前,然后来观察相应的计算结果并作图。使用者可以快速地实现许多不同的配置并很快地理解图形卷积的使用方法。

4.9.2 节中的图 4.73 给出了量化噪声以及噪声成形后信号的功率谱密度。而活动图形工具给出了播放一个实际音频文件时噪声和信号的频谱。读者可以在加上或不加上噪声成形处理以及使用一个低通滤波器过滤噪声的情况下,看到或听到噪声信号。

5.1.2 节中的图 5.5(a)给出了具有不同频率的三个脉冲信号,它们被送入一个 LTI 系统。

图 5.6 画出了 LTI 系统的输出。相关的活动图形工具允许学生通过对系统零、极点的位置、幅度、频率和脉冲位置进行实验来观察它们对系统输出的影响。以上只是配套网站提供的基于网页的众多活动图形中的三个例子。

## 图形建立

图形建立工具是对活动图形概念的进一步扩展。它指导学生利用 MATLAB 工具对选定的书中图形进行重新生成,以加强对基本概念的理解。图形建立工具并不是简单地给出构建一幅图形的具体步骤,而是在假设对 MATLAB 有基本了解的前提下,引入新的 MATLAB 命令和技术,将它们用来创建图形。这样不仅可以强化信号处理概念,还可以训练信号处理方面的 MATLAB 使用技巧。例如,2.1 节中的图 2.3 和图 2.5 画出了几个序列,相应的图形建立工具引入 MATLAB 作图命令对图形进行标注,包括希腊字符和图例添加。随后,图形建立工具便将该技术用于绘制图形。噪声成形和群时延图形建立(见图 4.73 和图 5.5)示例中包含了重建上述活动图形工具的指令。它们不是给出各步骤的指令,而是引入了新的 MATLAB 命令并建议在实验上有相当大自由的重建图形的方法。

## MATLAB 课后作业

配套网站通过 MATLAB 课后作业部分,提供了一种将 MATLAB 与作业题结合起来的基本框

架。该框架的一个方面就是利用课后作业来练习使用 MATLAB 工具,在某种程度上与图形建立工具风格一致。这些习题与不使用 MATLAB 的习题非常相似,只是采用了 MATLAB 之后使得某些部分更容易实现,例如对结果作图等。第二个方面是,采用 MATLAB 可以研究和解决不能用数学分析方法解决的问题。与本书中的基本习题相比较而言, MATLAB 习题都是用于课堂测试的,因此通常比较短,需要使用者利用 MATLAB 工具来完成简单的信号处理任务。这些习题的范围比较适中,是每周课后作业的几个习题中的一种典型习题。其中一部分习题与书中的分析习题直接关联,而另一部分则是完全独立的。许多习题将分析结果与 MATLAB 结合起来,目的在于强调两种方法彼此间的互补作用。

### 基于 MATLAB 的工程课题

基于 MATLAB 的工程课题部分涵盖了比家庭作业更长和更复杂的工程课题或练习。这些工程课题从比本书更深入的角度来研究一些重要概念,相对范围更广。各工程课题与书中的章节相对应,一旦掌握了相关章节的内容便可来使用工程课题。例如,第一个工程课题在某种程度上说是天然的教程,可以在任何阶段使用。它介绍了 MATLAB 软件并展示了如何将其用于创建和处理离散时间信号与系统。在这个工程课题里假设学生们已经有一定的编程经验,但不一定局限于 MATLAB 编程。其他许多工程课题则需要一些滤波器设计技能,因此它们与第 7 章(滤波器设计技术)或后面的章节相关联。它们研究这样一些题目,包括 FIR 和 IIR 滤波器设计、用于采样率变换的滤波器设计、关于人类听不到的信号中相位的“FOLK 理论”测试、通过去噪增强语音、实现去噪的硬件设计及频谱估计等。所有这些题目都已经过了课堂试验,其中某些题目还被包含进了学生刊物中。

### 演示

演示部分是与某些特殊章节相关的交互性示范说明。不同于活动图形工具,演示工具并不是直接与一幅给定的图像紧密联系的,而是用于阐明一个更大的想法,这种想法在学生完成了书中内容的学习后便能够理解。例如,有一个演示是用来说明在保持带限脉冲形状中利用线性相位滤波器的重要性。

### 补充的典型习题

网站的第六个重要部分收集了在本书第二版中为了给新习题腾出空间而删掉的习题,这些习题是对书中习题的补充。每个习题都以 pdf 形式或者 tex 格式与习题构成所需图形文件结合的形式来给出。

综上所述,该配套网站提供了一系列与本书紧密结合的丰富资料,这些资料从强化新概念的活动图形部分延伸到可以挑战学生超越教材而提出新想法的基于 MATLAB 的工程课题部分。随着本书作者以及网站开发者 Mark Yoder 和 Wayne Padgett 不断研究出新的教学资料,该网站也会继续向前发展。

## 致 谢

本书第三版是从前两个版本(1989,1999)发展而来的,它们的原型是我们的第一本书 *Digital Signal Processing*(1975)。许多对前期工作给予帮助、支持和贡献的同事、学生和朋友们,他们的影响和作用在这个新版本中仍然显著,这里再一次向在之前版本中明确表示感谢的人们表达我们深深的谢意。

在我们的职业生涯中,我们都非常幸运地得到了特别的教导。我们分别希望感谢几个对我们的生活和职业有重大影响的人。

Al Oppenheim 在研究生期间以及他的整个学术生涯中都得到了 Amar Bose 教授、Thomas Stockham 教授和 Ben Gold 博士的特别指导和深刻影响。Al 在担任 Bose 教授教学助理的几年时间里以及作为其指导的博士研究生期间,Bose 教授启发性的教学方法、富有创造性的研究风格和异常严谨的做人准则都给了 Al 极大的影响,这些特质是 Bose 教授在做任何事情时都坚守的。在 Al Oppenheim 职业生涯的早期,还非常有幸地与 Ben Gold 博士和 Thomas Stockham 教授建立了紧密的合作伙伴关系。Ben 所给予的莫大鼓励和榜样模范作用对 Al 指导和研究风格的形成有着重要影响。Tom Stockham 也同样给予了重要的指导、支持和鼓励,和 Al 成为好朋友的同时成为其另一个了不起的学习榜样。这些特别指导者们的影响贯穿于整本书中。

在对 Ron Schafer 产生影响的众多老师和导师之中,最值得一提的是 Levi T. Wilson 教授、Thomas Stockham 教授和 James L. Flanagan 博士。是 Wilson 教授将一个天真的小镇男孩带领进数学和科学的奇妙世界,改变了男孩的人生,让其永生难忘。他对于教学的贡献给人极大的鼓舞,让人无法抗拒。Stockham 教授是一个伟大的老师、一个患难之交、一个有益的伙伴和一个出色的富有创造性的工程师。Jim Flanagan 是语音科学和工程领域的巨人,对于所有与其共同工作过的人们来说,他们是如此幸运地得到了他的激励。并不是所有伟大的老师都冠有“教授”的头衔,Jim Flanagan 教会 Ron 和其他许多人懂得了仔细思考的价值、致力于学习的价值以及清楚而明晰地写作和表达的价值。Ron Schafer 直率地承认,他学习了许多来自这些伟大导师身上的思考和表达的习惯,并且坚信他们并不会介意。

在我们的学院生涯中,麻省理工学院和佐治亚理工学院为我们的研究和教学工作提供了一个激励的环境,并对这项不断发展的任务提供了鼓励和支持。自 1977 年以来,Al Oppenheim 已经在 Woods Hole 海洋学会(WHOI)度过了几个假期和几乎每一个夏天,对于这种特有的机会和协作,他表示深深的感激。本书各个版本的许多撰写都是在这期间以及在良好的 WHOI 环境中完成的。

在麻省理工学院和佐治亚理工学院,我们都获得了来自不同方面的大量资金支持。Al Oppenheim 特别要感谢来自 Ray Stata 先生和模拟仪器公司、Bose 基金以及麻省理工学院各种不同形式的资助研究和教学的 Ford 基金的支持。我们同时还要鸣谢德州仪器公司为我们的教学和研究工作给予的支持。特别要说的是,德州仪器公司的 Gene Frantz 是我们在两个研究机构里工作和进行普遍 DSP 教育的专门支持者。Ron Schafer 还要感谢 John 和 Mary Franklin 基金的慷慨支持,该基金在佐治亚理工学院设立了 John 和 Marilu McCarty 教授职位。佐治亚理工学院 ECE 学院的长期主管 Demetrius Paris,以及 Franklin 基金的 W. Kelly Mosley 和 Marilu McCarty,对于他们超过 30 年的友谊和大力支持,Ron Schafer 表示由衷的感谢。对于能够成为 Hewlett-Packard 实验室研究团队的成员,Son Schafer 表示感激,借助于多年来在佐治亚理工学院得到的研究支持,Schafer 于 2004 年成为了

HP 伙伴。如果没有得到 HP 实验室主管人员 Fred Kitson, Susie Wee 和 John Apostolopoulos 的鼓励和支持, 本书第三版将无法顺利完成。

我们与 Prentice Hall 的合作开始于几十年前, 即 1975 年出版的我们的第一本书, 而在本书三个版本以及其他著作的出版过程中我们仍然继续保持着合作。对于与 Prentice Hall 的共事与合作我们感到特别幸运。在本书和其他写作项目中, Marcia Horton 和 Tom Robbins 给予的鼓励和支持, 以及在本书第三版中 Michael McDonald、Andrew Gilfillan、Scott Disanno 和 Clare Romeo 所提供的鼓励与帮助, 极大地增强了作者写作和完成该项工作的乐趣。

同之前的版本一样, 在第三版的出版过程中我们非常荣幸地得到了许多同事、学生和朋友的帮助, 非常感谢他们耗费了大量的宝贵时间帮助我们完成这项工作。特别要对如下诸位表示我们的谢意:

感谢 John Buck 教授在第二版的筹备过程中发挥的巨大作用, 感谢其在第二版的整个生命过程中持续不断付出的时间和努力。

感谢 Vivek Goyal 教授, Jae Lim 教授, Gregory Wornell 教授, Victor Zue 教授以及 Babak Ayazifar 博士, Soosan Beheshti 博士和 Charles Rohrs 博士, 他们在麻省理工学院曾用过不同的版本进行教学, 感谢他们给本书提出的诸多有益评价和建议。

感谢 Tom Barnwell, Russ Mersereau 和 Jim McClellan 教授, 他们是 Ron Schafer 的老朋友和老同事, 他们经常用本书的不同版本来教学, 对本书的许多方面都有影响。

感谢 Rose-Hulman 技术学院的 Bruce Black 教授, 他精心准备了十年来最有价值的新习题, 并从中选出最好的, 将它们更新并整合到本书的各章节中。

感谢 Mark Yoder 教授和 Wayne Padgett 教授, 他们为这一版本开发了一个优秀的配套网站。

Ballard Blair 帮助更新了参考文献。

感谢 Eric Strattman, Darla Secor, Diane Wheeler, Stacy Schultz, Kay Gilstrap 和 Charlotte Doughty, 他们为这个修订本的准备给予了管理方面的帮助, 并对我们的教学活动提供持续的支持。

感谢 Tom Baran, 他解决了与这一版本文件管理相关的许多计算机问题, 并在一部分章节的例题方面做了大量工作。

感谢 Shay Maymon, 他细心地通读了本书的大部分章节, 重做了许多较为高深的习题, 给出了重要的修正和建议。

感谢以下各位帮助仔细校对了清样: Berkin Bilgic, Albert Chang, Myung Jin Choi Fozunbal, Reeve Ingle, Jeremy Leow, Ying Liu, Paul Ryu, Sanquan Song, Dennis Wei 和 Zahi Karam。

感谢许多教学助理, 他们同我们一起工作, 在麻省理工学院和佐治亚理工学院进行离散时间信号与系统的教学, 感谢他们对于本版本所给予的直接或间接的影响。

# 反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可,复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为;歪曲、篡改、剽窃本作品的行为,均违反《中华人民共和国著作权法》,其行为人应承担相应的民事责任和行政责任,构成犯罪的,将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序,保护权利人的合法权益,本社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为,本社将奖励举报有功人员,并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话:(010)88254396;(010)88258888

传 真:(010)88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址:北京市海淀区万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编:100036



# 目 录

第 1 章 绪论	1
第 2 章 离散时间信号与系统	7
2.0 引言	7
2.1 离散时间信号	8
2.2 离散时间系统	12
2.3 线性时不变(LTI)系统	16
2.4 线性时不变系统的性质	21
2.5 线性常系数差分方程	25
2.6 离散时间信号与系统的频域表示	28
2.7 用傅里叶变换表示序列	34
2.8 傅里叶变换的对称性质	38
2.9 傅里叶变换定理	40
2.10 离散时间随机信号	46
2.11 小结	49
习题	50
第 3 章 $z$ 变换	71
3.0 引言	71
3.1 $z$ 变换	71
3.2 $z$ 变换收敛域的性质	79
3.3 $z$ 逆变换	82
3.4 $z$ 变换性质	87
3.5 $z$ 变换与 LTI 系统	93
3.6 单边 $z$ 变换	96
3.7 小结	97
习题	98
第 4 章 连续时间信号的采样	109
4.0 引言	109
4.1 周期采样	109
4.2 采样的频域表示	110
4.3 由样本重构带限信号	116
4.4 连续时间信号的离散时间处理	118
4.5 离散时间信号的连续时间处理	124
4.6 利用离散时间处理改变采样率	127
4.7 多采样率信号处理	137
4.8 模拟信号的数字处理	145
4.9 在 A/D 和 D/A 转换中的过采样和噪声形成	158

4.10 小结 .....	167
习题 .....	167
<b>第5章 线性时不变系统的变换分析 .....</b>	<b>193</b>
5.0 引言 .....	193
5.1 LTI 系统的频率响应 .....	193
5.2 用线性常系数差分方程表征系统 .....	199
5.3 有理系统函数的频率响应 .....	204
5.4 幅度和相位之间的关系 .....	212
5.5 全通系统 .....	214
5.6 最小相位系统 .....	218
5.7 广义线性相位的线性系统 .....	226
5.8 小结 .....	238
习题 .....	239
<b>第6章 离散时间系统结构 .....</b>	<b>262</b>
6.0 引言 .....	262
6.1 线性常系数差分方程的方框图表示 .....	263
6.2 线性常系数差分方程的信号流图表示 .....	267
6.3 IIR 系统的基本结构 .....	270
6.4 转置形式 .....	276
6.5 FIR 系统的基本网络结构 .....	278
6.6 格型滤波器 .....	281
6.7 有限精度数值效应概述 .....	288
6.8 系数量化效应 .....	292
6.9 数字滤波器中的舍入噪声效应 .....	302
6.10 IIR 数字滤波器定点实现中的零输入极限环 .....	317
6.11 小结 .....	320
习题 .....	320
<b>第7章 滤波器设计方法 .....</b>	<b>339</b>
7.0 引言 .....	339
7.1 滤波器技术指标 .....	339
7.2 由连续时间滤波器设计离散时间 IIR 滤波器 .....	341
7.3 离散时间巴特沃思、切比雪夫和椭圆滤波器 .....	350
7.4 低通 IIR 滤波器的频率变换 .....	362
7.5 用窗函数法设计 FIR 滤波器 .....	367
7.6 Kaiser 窗法设计 FIR 滤波器举例 .....	375
7.7 FIR 滤波器的最佳逼近 .....	382
7.8 FIR 等波纹逼近举例 .....	395
7.9 IIR 和 FIR 数字滤波器的评价 .....	401
7.10 增采样滤波器的设计 .....	401
7.11 小结 .....	404
习题 .....	404