

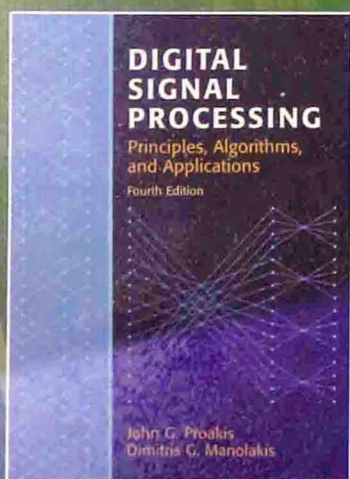
国外电子与通信教材系列

PEARSON

数字信号处理

——原理、算法与应用

(第四版)



Digital Signal Processing
Principles, Algorithms, and Applications
Fourth Edition

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

方艳梅 刘永清 等译



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

数字信号处理

——原理、算法与应用（第四版）

Digital Signal Processing

Principles, Algorithms, and Applications

Fourth Edition

[美] John G. Proakis Dimitris G. Manolakis 著
方艳梅 刘永清 等译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书全面系统地阐述了数字信号处理的基础知识,其中前10章讲述了确定性数字信号处理的知识,包括离散时间信号及系统的介绍、 z 变换、傅里叶变换、频率分析以及滤波器设计等。后4章则介绍了随机数字信号处理的知识,主要学习多速率数字信号处理、线性预测、自适应滤波以及功率谱估计。本书内容全面丰富、系统性强、概念清晰。叙述深入浅出,为了帮助读者深刻理解基本理论和分析方法,书中列举了大量的精选例题,同时还给出了许多基于MATLAB的仿真实验。另外,在各章的最后还附有习题,以帮助读者进一步巩固所学知识。

本书可作为电子工程、计算机工程、信号处理以及通信工程等专业的本科和研究生教材,也适合于教师和广大科技工作者参考使用。

Authorized translation from the English language edition, entitled Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications, Fourth Edition, 9780131873742 by John G. Proakis and Dimitris G. Manolakis, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2007 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 © 2014.

本书中文简体字版专有出版权由 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: 01-2006-7672

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理:原理、算法与应用:第4版/(美)普罗克斯著;方艳梅等译.

北京:电子工业出版社,2014.8

书名原文:Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications, Fourth Edition

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-23868-0

I. ①数… II. ①普… ②方… III. ①数字信号处理—高等学校—教材 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第168741号



策划编辑:谭海平

责任编辑:谭海平(tan02@phei.com.cn)

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:51 字数:1325千字

版次:2014年8月第1版(原著第4版)

印次:2014年8月第1次印刷

定价:85.00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

本书是数字信号处理的经典教材,是作者在多年教学的基础上编写而成的。其版本不断更新,内容涵盖了离散时间信号、系统和现代数字信号处理的基础知识。本书的每一章均从基本概念入手,详细阐述各种基本理论与分析方法,并在介绍中给出了许多数字信号处理的应用实例,以及基于 MATLAB 的仿真实验。在学习完本书以后,学生即可掌握数字信号处理的基础知识及实际应用。

本书作者 John G. Proakis 是美国东北大学电子与计算机工程系教授,其研究方向为数字通信与数字信号处理,主要包括自适应滤波、自适应通信系统、自适应均衡技术、多径衰落信道的通信、雷达探测、信号参数估计、通信系统建模与仿真、最优化技术、统计分析等,已多次出版《数字信号处理》和《数字通信》等经典著作。第二位作者 Dimitris G. Manolakis 工作于美国麻省理工学院林肯实验室,主要研究方向是数字通信与数字信号处理。他们在本书中融入了多年的教学及实践经验,并且注重理论与实际相结合。

本书共分为 14 章及两个附录,其中前 10 章讲述了基本数字信号处理知识,依次为:绪论、离散时间信号与系统、 z 变换及其在 LTI 系统分析中的应用、信号的频率分析、LTI 系统的频域分析、信号的采样与重建、离散傅里叶变换的特性及应用、DFT 的有效计算:快速傅里叶变换算法、离散时间系统的实现、数字滤波器设计。后 4 章介绍了高级数字信号处理,包括多速率数字信号处理、线性预测和最优线性滤波器、自适应滤波器以及功率谱估计。附录 A 介绍随机数发生器,附录 B 摘录了用于线性相位 FIR 滤波器设计的转换系数表。最后,作者还给出了参考书目及精选习题答案。

参加本书翻译工作的有方艳梅、刘永清、梁小萍、杨锐、屈振华,由方艳梅和刘永清完成全书的审校工作。

限于译者水平,本书疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

译者

前 言

本书是作者近几年来在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、信号采样和重构等章节。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的。

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,包括谐振器、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构原始信号的内容。所涉及的范围包括带通信号的采样和重构,离散时间信号的采样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、格形和带抽头的格形滤波器结构的实现。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 格形和 ARMA 格形抽头滤波器。

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 和格形 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6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基于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. Monticciolo, 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

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信号、系统及信号处理	1
1.1.1 数字信号处理系统的基本组成	3
1.1.2 数字信号处理与模拟信号处理相比的优点	3
1.2 信号分类	4
1.2.1 多通道信号与多维信号	4
1.2.2 连续时间信号和离散时间信号	6
1.2.3 连续值信号与离散值信号	7
1.2.4 确定性信号与随机信号	8
1.3 连续时间信号与离散时间信号中的频率概念	8
1.3.1 连续时间正弦信号	8
1.3.2 离散时间正弦信号	9
1.3.3 谐波相关的复指数信号	12
1.4 模数和数模转换	13
1.4.1 模拟信号采样	14
1.4.2 采样定理	19
1.4.3 连续幅度信号的量化	22
1.4.4 正弦信号的量化	24
1.4.5 量化采样信号的编码	25
1.4.6 数模转换	25
1.4.7 数字信号与系统及离散时间信号与系统的分析	26
1.5 小结与参考文献	26
习题	27
第 2 章 离散时间信号与系统	30
2.1 离散时间信号	30
2.1.1 一些基本的离散时间信号	31
2.1.2 离散时间信号的分类	33
2.1.3 离散时间信号的简单处理	36
2.2 离散时间系统	38
2.2.1 系统的输入—输出描述	39
2.2.2 离散时间系统的结构图表示	41
2.2.3 离散时间系统的分类	42
2.2.4 离散时间系统的互连	48
2.3 离散时间线性时不变系统的分析	50

2.3.1	线性系统的分析方法	50
2.3.2	离散时间信号分解为冲激信号	51
2.3.3	LTI 系统对任意输入的响应:卷积和	52
2.3.4	卷积的性质以及 LTI 系统的互连	58
2.3.5	因果 LTI 系统	60
2.3.6	线性时不变系统的稳定性	62
2.3.7	有限长和无限长冲激响应的系统	64
2.4	由差分方程描述的离散时间系统	64
2.4.1	递归和非递归的离散时间系统	65
2.4.2	由常系数差分方程描述的线性时不变系统的特性	68
2.4.3	线性常系数差分方程的解	71
2.4.4	线性时不变递归系统的冲激响应	77
2.5	离散时间系统的实现	79
2.5.1	线性时不变系统的实现结构	79
2.5.2	FIR 系统的递归和非递归实现	82
2.6	离散时间信号的相关	84
2.6.1	互相关和自相关序列	86
2.6.2	自相关和互相关序列的性质	87
2.6.3	周期序列的相关	90
2.6.4	输入—输出相关序列	92
2.7	小结与参考文献	94
	习题	94
第 3 章	z 变换及其在线性时不变系统分析中的应用	108
3.1	z 变换	108
3.1.1	z 正变换	108
3.1.2	z 逆变换	113
3.2	z 变换的性质	115
3.3	有理 z 变换	125
3.3.1	极点和零点	125
3.3.2	因果信号的极点位置和时域行为	127
3.3.3	线性时不变系统的系统函数	128
3.4	z 逆变换	131
3.4.1	围线积分法求 z 逆变换	131
3.4.2	幂级数展开法求 z 逆变换	133
3.4.3	部分分式展开法求 z 逆变换	134
3.4.4	有理 z 变换的分解	140
3.5	z 域线性时不变系统的分析	141
3.5.1	有理系统函数的系统响应	142
3.5.2	暂态响应和稳态响应	142

3.5.3	因果性和稳定性	143
3.5.4	零极点抵消	145
3.5.5	多阶极点和稳定性	146
3.5.6	二阶系统的稳定性	147
3.6	单边 z 变换	150
3.6.1	定义和性质	151
3.6.2	差分方程的求解	154
3.6.3	具有非零初始条件的零极点系统的响应	155
3.7	小结与参考文献	156
	习题	157
第 4 章	信号的频率分析	165
4.1	连续时间信号的频率分析	165
4.1.1	连续时间周期信号的傅里叶级数	166
4.1.2	周期信号的功率密度谱	169
4.1.3	连续时间非周期信号的傅里叶变换	172
4.1.4	非周期信号的能量密度谱	175
4.2	离散时间信号的频率分析	178
4.2.1	离散时间周期信号的傅里叶级数	178
4.2.2	周期信号的功率密度谱	181
4.2.3	离散时间非周期信号的傅里叶变换	183
4.2.4	傅里叶变换的收敛性	185
4.2.5	非周期信号的能量密度谱	188
4.2.6	傅里叶变换和 z 变换的关系	191
4.2.7	倒频谱	193
4.2.8	单位圆上有极点的信号的傅里叶变换	194
4.2.9	信号的频域分类:带宽的概念	195
4.2.10	某些自然信号的频率范围	197
4.3	频域和时域的信号特性	198
4.4	离散时间信号傅里叶变换的性质	200
4.4.1	傅里叶变换的对称性质	201
4.4.2	傅里叶变换的定理和性质	206
4.5	小结与参考文献	214
	习题	215
第 5 章	LTI 系统的频域分析	222
5.1	线性时不变系统的频域特性	222
5.1.1	对复指数和正弦信号的响应:频率响应函数	222
5.1.2	正弦输入信号的稳态和暂态响应	229
5.1.3	周期输入信号的稳态响应	230
5.1.4	非周期输入信号的响应	230

5.2	LTI系统的频率响应	232
5.2.1	具有有理系统函数系统的频率响应	232
5.2.2	频率响应函数的计算	234
5.3	LTI系统输出的相关函数和频谱	237
5.3.1	输入-输出相关函数和频谱	237
5.3.2	随机输入信号的相关函数和功率谱	238
5.4	作为频率选择滤波器的线性时不变系统	240
5.4.1	理想滤波器特性	241
5.4.2	低通、高通和带通滤波器	243
5.4.3	数字谐振器	247
5.4.4	槽口滤波器	249
5.4.5	梳状滤波器	250
5.4.6	全通滤波器	253
5.4.7	数字正弦振荡器	255
5.5	逆系统和去卷积	257
5.5.1	线性时不变系统的可逆性	257
5.5.2	最小相位、最大相位及混合相位系统	260
5.5.3	系统辨识与去卷积	263
5.5.4	同态去卷积	265
5.6	小结与参考文献	266
	习题	266
第6章	信号的采样与重建	282
6.1	理想的连续时间信号采样与重建	282
6.2	连续时间信号的离散时间处理	290
6.3	模数转换器和数模转换器	295
6.3.1	模数转换器	295
6.3.2	量化与编码	296
6.3.3	量化误差分析	299
6.3.4	数模转换器	300
6.4	连续时间带通信号的采样与重建	302
6.4.1	均匀或一阶采样	302
6.4.2	交叉或非均匀二阶采样	306
6.4.3	带通信号的表示	311
6.4.4	利用带通信号表示进行采样	313
6.5	离散时间信号采样	314
6.5.1	离散时间信号采样和插值	314
6.5.2	带通离散时间信号表示和采样	318
6.6	过采样 A/D 转换器和 D/A 转换器	319
6.6.1	过采样 A/D 转换器	319

6.6.2	过采样 D/A 转换器	324
6.7	小结与参考文献	325
	习题	325
第 7 章	离散傅里叶变换的特性及应用	332
7.1	频域采样:离散傅里叶变换	332
7.1.1	离散时间信号的频域采样和重建	332
7.1.2	离散傅里叶变换	336
7.1.3	DFT 是线性变换	339
7.1.4	DFT 与其他变换的关系	341
7.2	DFT 的性质	343
7.2.1	周期性、线性和对称性	344
7.2.2	两个 DFT 的乘法和圆周卷积	348
7.2.3	DFT 的其他性质	352
7.3	基于 DFT 的线性滤波算法	356
7.3.1	在线性滤波中使用 DFT	356
7.3.2	长数据序列滤波	360
7.4	利用 DFT 对信号进行频率分析	362
7.5	离散余弦变换	367
7.5.1	FDCT	367
7.5.2	IDCT	368
7.5.3	DCT 是正交变换	369
7.6	小结与参考文献	372
	习题	372
第 8 章	DFT 的有效计算:快速傅里叶变换算法	379
8.1	DFT 的有效计算:FFT 算法	379
8.1.1	直接计算 DFT	380
8.1.2	用分而治之的方法计算 DFT	380
8.1.3	基 2 FFT 算法	384
8.1.4	基 4 FFT 算法	391
8.1.5	分裂基 FFT 算法	395
8.1.6	FFT 算法的实现	398
8.2	FFT 算法的应用	399
8.2.1	有效计算两个实序列的 DFT	399
8.2.2	有效计算 $2N$ 点实序列的 DFT	400
8.2.3	FFT 算法在线性滤波与相关分析中的应用	400
8.3	用线性滤波法计算 DFT	402
8.3.1	Goertzel 算法	402
8.3.2	调频 z 变换算法	403
8.4	DFT 计算中的量化效应	407

8.4.1	直接计算 DFT 的量化误差	407
8.4.2	FFT 算法的量化误差	409
8.5	小结与参考文献	412
	习题	412
第 9 章	离散时间系统的实现	417
9.1	离散时间系统的实现结构	417
9.2	FIR 系统的结构	418
9.2.1	直接型结构	418
9.2.2	级联型结构	419
9.2.3	频率采样结构	421
9.2.4	格形结构	423
9.3	IIR 系统的结构	431
9.3.1	直接型结构	431
9.3.2	信号流图和转置结构	432
9.3.3	级联型结构	435
9.3.4	并联型结构	437
9.3.5	IIR 系统的格形结构和格形梯状结构	439
9.4	数的表示	445
9.4.1	数的定点表示	445
9.4.2	二进制数的浮点表示	447
9.4.3	舍入与截尾引起的误差	449
9.5	滤波器系数的量化效应	452
9.5.1	滤波器系数量化效应的敏感度分析	453
9.5.2	FIR 滤波器的系数量化	459
9.6	数字滤波器中的舍入效应	460
9.6.1	递归系统的极限环振荡	461
9.6.2	尺度变换以防止溢出	464
9.6.3	数字滤波器定点实现中量化效应的统计描述	465
9.7	小结与参考文献	471
	习题	472
第 10 章	数字滤波器设计	481
10.1	整体考虑	481
10.1.1	因果性及其含义	481
10.1.2	实际选频滤波器的特性	484
10.2	FIR 滤波器的设计	485
10.2.1	对称和反对称的 FIR 滤波器	485
10.2.2	使用窗函数设计线性相位 FIR 滤波器	488
10.2.3	采用频率采样方法设计线性相位 FIR 滤波器	492
10.2.4	最优等纹波线性相位 FIR 滤波器的设计	498

10.2.5	FIR 微分器设计	508
10.2.6	希尔伯特变换器的设计	509
10.2.7	线性相位 FIR 滤波器设计方法的比较	514
10.3	从模拟滤波器设计 IIR 滤波器	516
10.3.1	用导数逼近设计 IIR 滤波器	517
10.3.2	用冲激不变设计 IIR 滤波器	520
10.3.3	利用双线性变换设计 IIR 滤波器	524
10.3.4	通用模拟滤波器的特性	527
10.3.5	基于双线性变换的数字滤波器设计的一些例子	534
10.4	频率变换	537
10.4.1	模拟域频率变换	537
10.4.2	数字域频率变换	538
10.5	小结与参考文献	540
	习题	541
第 11 章	多速率数字信号处理	552
11.1	引言	552
11.2	以因子 D 抽取	556
11.3	以因子 I 内插	558
11.4	以有理因子 I/D 转换采样率	560
11.5	采样率转换的实现	563
11.5.1	多相滤波器结构	563
11.5.2	滤波器和下采样器/上采样器的相互交换	565
11.5.3	利用级联积分器的梳状滤波器转换采样率	565
11.5.4	抽取和内插滤波器的多相结构	567
11.5.5	有理采样率转换的结构	570
11.6	采样率转换的多级实现	571
11.7	带通信号的采样率转换	573
11.8	以任意因子的采样率转换	575
11.8.1	利用多相内插器任意重采样	575
11.8.2	利用 Farrow 滤波器结构任意重采样	576
11.9	多速率信号处理的应用	577
11.9.1	移相器的设计	577
11.9.2	不同采样率数字系统的接口技术	578
11.9.3	窄带低通滤波器的实现	579
11.9.4	语音信号子带编码	580
11.10	数字滤波器组	581
11.10.1	均匀滤波器组的多相结构	585
11.10.2	复用转接器	586
11.11	双通道正交镜像滤波器组	587

11.11.1	消除混叠效应	589
11.11.2	准确重构的条件	590
11.11.3	QMF 组的多相形式	590
11.11.4	线性相位 FIR QMF 组	590
11.11.5	IIR QMF 组	592
11.11.6	准确重构双通道 FIR QMF 组	592
11.11.7	子带编码中的双通道 QMF 组	594
11.12	M 通道 QMF 组	594
11.12.1	无混叠和准确重构的条件	595
11.12.2	M 通道 QMF 组的多相形式	596
11.13	小结与参考文献	599
	习题	600
第 12 章	线性预测和最优线性滤波器	606
12.1	随机信号、相关函数和功率谱	606
12.1.1	随机过程	606
12.1.2	平稳随机过程	607
12.1.3	统计(集合)平均	607
12.1.4	联合随机过程的统计平均	608
12.1.5	功率谱密度	609
12.1.6	离散时间随机信号	610
12.1.7	离散时间随机过程的时间平均	611
12.1.8	均值遍历过程	612
12.1.9	相关遍历过程	613
12.2	平稳随机过程的修正表示	614
12.2.1	有理功率谱	615
12.2.2	滤波器参数和自相关序列的关系	616
12.3	前向和后向线性预测	617
12.3.1	前向线性预测	617
12.3.2	后向线性预测	619
12.3.3	格形前向和后向预测器的最优反射系数	622
12.3.4	AR 过程和线性预测的关系	623
12.4	正规方程的解	623
12.4.1	Levinson-Durbin 算法	623
12.4.2	Schur 算法	626
12.5	线性预测误差滤波器的性质	630
12.6	AR 格形和 ARMA 格形梯状滤波器	632
12.6.1	AR 格形结构	633
12.6.2	ARMA 过程和格形梯状滤波器	634
12.7	用于滤波和预测的维纳滤波器	636

12.7.1	FIR 维纳滤波器	636
12.7.2	线性均方估计的正交性原理	638
12.7.3	IIR 维纳滤波器	639
12.7.4	非因果维纳滤波器	643
12.8	小结与参考文献	644
	习题	645
第 13 章	自适应滤波器	649
13.1	自适应滤波器的应用	649
13.1.1	系统标识或系统模型	650
13.1.2	自适应通道均衡器	651
13.1.3	电话通道数据传输中的回声消除	653
13.1.4	对宽带信号中的窄带干扰的抑制	655
13.1.5	自适应线谱增强器	659
13.1.6	自适应噪声消除	659
13.1.7	语音信号的线性预测编码	660
13.1.8	自适应阵列	663
13.2	自适应直接型 FIR 滤波器——LMS 算法	664
13.2.1	最小均方误差准则	665
13.2.2	LMS 算法	667
13.2.3	随机梯度相关算法	668
13.2.4	LMS 算法的性质	669
13.3	自适应直接型滤波器——RLS 算法	674
13.3.1	RLS 算法	675
13.3.2	LDU 因式分解与平方根算法	678
13.3.3	快速 RLS 算法	679
13.3.4	直接型 RLS 算法的性质	681
13.4	自适应格形梯状滤波器	683
13.4.1	递归最小二乘方格形梯状算法	683
13.4.2	其他格形算法	700
13.4.3	格形梯状算法的性质	701
13.5	小结与参考文献	704
	习题	704
第 14 章	功率谱估计	708
14.1	基于有限长信号观察的功率谱估计	708
14.1.1	能量密度谱计算	708
14.1.2	随机信号的自相关和功率谱估计:周期图	712
14.1.3	使用 DFT 的功率谱估计	715
14.2	功率谱估计的非参数化方法	717
14.2.1	Bartlett 方法:平均周期图	717

14.2.2	Welch 方法:平均修正的周期图	719
14.2.3	Blackman 和 Tukey 图基方法:平滑周期图	720
14.2.4	非参数的功率谱估计器的性能特征	722
14.2.5	非参数的功率谱估计器的计算需求	725
14.3	功率谱估计的参数化方法	726
14.3.1	自相关和模型参数之间的关系	727
14.3.2	AR 模型参数的 Yule-Walker 求解方法	729
14.3.3	AR 模型参数的 Burg 求解方法	729
14.3.4	AR 模型参数的非约束条件的最小二乘方求解方法	732
14.3.5	AR 模型参数的顺序估计方法	733
14.3.6	AR 模型阶数的选择	733
14.3.7	功率谱估计的 MA 模型	734
14.3.8	功率谱估计的 ARMA 模型	735
14.3.9	一些实验结果	737
14.4	滤波器组方法	742
14.4.1	周期图的滤波器组实现	742
14.4.2	最小方差谱估计	744
14.5	功率谱估计的本征分析方法	746
14.5.1	Pisarenko 谐波分解方法	747
14.5.2	具有白噪声的正弦信号的自相关矩阵的本征分解	749
14.5.3	MUSIC 算法	750
14.5.4	ESPRIT 算法	752
14.5.5	阶数选择准则	754
14.5.6	实验结果	754
14.6	小结与参考文献	756
	习题	757
附录 A	随机数字发生器	765
附录 B	线性相位 FIR 滤波器设计的转换系数表	769
参考文献	774
习题答案	787
索引	796

第1章 绪 论

数字信号处理是过去四十年快速发展起来的科学和工程领域。这种快速发展是数字计算机技术和集成电路技术迅猛发展的结果。四十年以前的数字计算机及相关硬件相对庞大和昂贵,因此,其使用仅限制于一般用途的非实时(脱机)科学计算和商业应用。集成电路技术的快速发展[从中规模集成电路(MSI)到大规模集成电路(LSI),再到现在的超大规模集成电路(VLSI)],促进了功率更大、体积更小、速度更快、价格更便宜的数字计算机及特殊用途的数字硬件技术的发展。这些更便宜的、相对更快的数字电路使得构造更复杂的数字系统成为可能,以执行更复杂的数字信号处理功能和任务,这些任务通常太复杂、太昂贵,以至于不能由模拟电路或模拟信号处理系统来执行。因此,很多传统上由模拟方法执行的信号处理任务,现在都可由更廉价和更可靠的数字硬件来实现。

这并不是说数字信号处理就是所有信号处理问题的合适解决方案。事实上,对于很多带宽相当宽的信号,需要实时处理。对于这样的信号,模拟信号处理或光信号处理是唯一可能的解决方案。然而,对于可用数字电路并具有充分速率执行信号处理任务的场合,我们通常优先考虑使用数字电路。

数字电路不但能产生更廉价、更可靠的数字处理系统,而且还具有其他一些优点。特别是,数字处理硬件允许可编程操作。借助软件,人们可以更容易地修改将由硬件执行的信号处理函数。数字硬件及其相关软件在系统设计方面提供了更大的灵活性。同时,数字硬件和软件实现与模拟电路和模拟信号处理系统相比,通常具有更高的精度。基于上述原因,在过去的三十年里,数字信号处理理论和应用得到了迅猛发展。

本书的目的是讲述用于信号数字处理的基本分析工具和技术。先介绍一些必要的术语,然后描述在模拟信号转换成适合数字处理的数字信号的过程中所涉及的重要操作。正如我们所看到的,模拟信号的数字处理有一些缺陷。首先,模拟信号到数字形式的转换是由信号采样和量化来完成的,这将产生失真,从而阻止我们从量化后的采样信号重构原始模拟信号。但通过适当地选择量化过程中的采样率和量化精度,这种失真量可以得到控制。其次,在对量化的采样信号进行数字处理时,必须考虑有限精度效应。尽管本书中也会讲述这些重要问题,但重点会放在数字信号处理系统的分析和设计以及计算技术方面。

1.1 信号、系统及信号处理

信号定义为随着时间、空间或其他自变量而变化的物理量。数学上,我们把一个信号描述为一个或几个自变量的函数。例如,函数

$$\begin{aligned} s_1(t) &= 5t \\ s_2(t) &= 20t^2 \end{aligned} \tag{1.1.1}$$

描述了两个信号,一个随着自变量 t (时间) 线性变化,而另一个随着 t 二次方变化。作为另一个例子,考虑函数

$$s(x, y) = 3x + 2xy + 10y^2 \tag{1.1.2}$$

该函数描述了具有两个自变量 x 和 y 的信号,这两个自变量可以表示一个平面上的两个空间坐标。