

国外经典教材

Digital Signal Processing:
Principles, Algorithms, and Applications
Third Edition

数字信号处理： 原理、算法与应用

(第三版)



[美] John G. Proakis 著
Dimitris G. Manolakis
张晓林 译
肖创柏 译审

Prentice
Hall



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications
Third Edition

数字信号处理：原理、算法与应用

(第三版)

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

张晓林 译
肖创柏 译审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书的内容是作者在过去几年中针对本科生和研究生阶段的数字信号处理教学的基础上形成的。书中给出了离散时间信号、系统和现代信号处理算法的基本原理，并针对电子工程、计算机工程和计算机科学专业的学生介绍了它们的应用，重点集中于数字信号处理系统的分析和设计以及计算机实现。内容编排既侧重于理论又深入实际应用，而且每章后都有许多精心设计的习题来帮助读者掌握所学知识。

本书适用于电子工程、计算机工程专业本科高年级学生和研究生以及通信和计算机专业技术人员。

本书的前言以及第一章到第四章由张晓林组织翻译，第五章到结尾由肖创柏翻译，全书由肖创柏审校。



©1996 by Prentice-Hall, Inc.

Upper Saddle River, New Jersey 07458

All rights reserved. No part of this book may be reproduced, in any form or by any means, without permission in writing from the publisher.

本书英文版由Prentice-Hall, Inc.公司出版，Prentice-Hall, Inc.公司已将中文版独家版权授予中国电子工业出版社及北京美迪亚电子信息有限公司。未经许可，不得以任何形式和手段复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字：01-2002-5472

图书在版编目 (CIP) 数据

数字信号处理：原理、算法与应用（第三版）/（美）普罗奇斯（Proakis, J. G.）等著；张晓林译.—北京：电子工业出版社，2004.5

书名原文：Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications Third Edition
ISBN 7-120-00011-X

I. 数… II. ①普… ②张… III. 数字信号—信号处理 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字（2004）第043559号

责任编辑：春 丽

印 刷：北京天竺颖华印刷厂

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

北京市海淀区翠微东里甲2号 邮编：100036

经 销：各地新华书店

开 本：787×1092 1/16 印张：52.75 字数：1300千字

印 次：2004年5月第1次印刷

定 价：78.00元

凡购买电子工业出版社的图书，如有缺损问题，请向购买书店调换，若书店售缺，请与本社发行部联系。联系电话：（010）68279077。质量投诉请发邮件至zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

前 言

本书是我们在过去几年中针对本科生和研究生阶段的数字信号处理教学的基础上形成的。在这本书中,我们给出了离散时间信号、系统和现代信号处理算法的基本原理,并针对电子工程、计算机工程和计算机科学专业的学生介绍了它们的应用。本书既适合于一个学期又适合于两个学期的本科生阶段在离散时间系统和数字信号处理方面的课程,同时,它也适合于研究生一年级阶段为期一个学期的数字信号处理教学任务。

我们假设在学习本书前电子工程和计算机工程专业的本科生已经学习过高等微积分(包括普通差分方程)和连续时间信号线性系统,包括拉氏变换。虽然我们将在第四章中介绍傅里叶级数以及周期和非周期信号的傅里叶变换,但是我们还是希望同学们在以前的课程中学过这些知识。

这本书既侧重于理论又侧重于实际应用。每章后有许多精心设计的习题来帮助学生们掌握其内容。为了方便讲师,我们准备了习题解答手册,需要者可以和出版商联系。

该书的第二版和第三版的内容基本相同,但组织形式不同。主要的不同之处在于介绍 DFT 和 FFT 算法的顺序不同。根据一些读者的建议,我们在讲述完傅里叶分析后紧接着介绍 DFT 以及它的高效算法。这样的组织方法可以避免重复与 DFT 及其应用有关的内容。

在第一章中,我们描述了模拟信号的 A/D 变换。我们详细描述了正弦信号的取样过程并解释了混叠问题。信号的量化和 D/A 变换也大致提到了,但会在后续章节中仔细分析。

第二章完整地讲述和分析了线性时不变(平移不变)离散时间系统和时域中的离散时间信号的特点。我们推导了卷积和公式并且把系统按照它们的冲击响应是有限冲击响应(FIR)还是无限冲击响应(IIR)进行分类。通过差分方程的形式介绍了线性时不变系统特性并且给出了在不同初始状态下差分方程解的形式。这一章还介绍了离散时间信号的相关运算。

第三章介绍了 z 变换。既包括双边 z 变换也包括单边 z 变换,而且还介绍了逆 z 变换。我们讲述了 z 变换在分析线性时不变系统中的应用,系统的一些重要属性,例如因果性和稳定性都与 z 域的一些特性有关。

第四章在频域对信号与系统进行分析。给出了连续时间和离散时间信号的傅里叶级数和傅里叶变换。线性时不变(LTI)离散时间系统的特性可用它们在频域上的频率响应函数来描述,并且系统对于周期信号和非周期信号的响应也可以由此确定。对很多重要的离散时间系统也做了相应的介绍,包括谐振器、陷波器、梳状滤波器、全通滤波器以及振荡器。许多简单的 FIR 和 IIR 滤波器的设计也相应地做了介绍。除此之外还介绍了一些概念,包括最小相位、混合相位和最大相位系统以及反卷积的问题。

第五章介绍了 DFT 的性质和应用,并介绍了两种用 DFT 构建线性滤波器的方法。本章还涉及到用 DFT 对信号进行频率分析的方法。

第六章介绍了高效 DFT 算法。讲述了基 2、基 4 和时间抽取快速傅里叶变换(FFT)算法以及用 FFT 算法来计算卷积和相关。Goertzel 算法和线性调频- z 变换作为用线性滤波器实现 DFT 的两种方法也做了相应的介绍。

第七章讲述 IIR 和 FIR 系统的实现。包括直接型、串连型、并联型、格型和格-梯型实现方式。本章还介绍了状态空间分析法和离散时间系统的结构,以及 FIR 和 IIR 数字方式实现中的量化问题。

第八章介绍了数字 FIR 和 IIR 滤波器设计的方法问题。这些方法既包括离散时间中的直接设计方法,也包括模拟滤波器转换成数字滤波器的各种变换方法。本章还介绍了用最小平方法实现 FIR 和 IIR 滤波器的方法。

第九章介绍了连续时间信号的取样以及用样本重建信号的问题。本章中,我们推导了带通连续时间信号取样定理并且介绍了 A/D 和 D/A 变换器,其中包括过取样 A/D 和 D/A 变换器。

第十章深入地介绍了取样率变换以及它在多速率数字信号处理中的应用。除了抽取和插值,我们还提出了一种任意系数取样变换法。本章还介绍了几个多速率数字信号处理的应用例子,包括数字滤波器的实现、语音信号的子带编码、复用技术以及过取样 A/D 和 D/A 变换器。

第十一章介绍了线性预测和最佳线性(维纳)滤波器。本章还介绍了解普通方程的 Levinson-Durbin 算法和 Schür 算法,以及 AR 网络和 ARMA 网络-梯型滤波器。

第十二章介绍了功率谱估计。包括非参数法和基于模型(参数)估计法。本章还介绍了本征分解法,包括 MUSIC 法和 ESPRIT 法。

在西北大学里,本书前六章内容是作为(低年级)离散时间系统和数字信号处理课程一学期的授课内容。

针对以前学过离散系统的学生的一学期高级教程可以用第一章~第四章的内容快速复习一下,之后再学习第五章~第八章的内容。

对于数字信号处理研究生一年级的课程,前五章可以使学生复习一下离散时间系统。老师可以在很快地介绍这几章的内容后具体讲授第六~第九章,接下来可以讲第十和第十一章或第十一和第十二章。

这本书中有许多的例子以及将近 500 道习题。许多习题可以用计算机来解答,比如借助软件包 MATLAB[®],这些习题用星号标出来。附录 D 包括了 MATLAB 函数表,学生可以借助这张表求解这些习题。教师可以借助一些有需要上机操作的习题的参考书,例如 V. K. Ingle 和 J. G. Proakis 写的“Digital Signal Processing Using MATLAB”(P. W. S. Kent, 1996), C. S. Burrus 写的“Computer-Based Exercises for Signal Processing Using MATLAB”(Prentice Hall, 1994)等等。

感谢许多同行对于本书第一版和第二版所提出的宝贵意见。他们是 Drs. W. E. Alexander, Y. Bresler, J. Deller, V. Ingle, C. Keller, H. Lev-Ari, L. Merakos, W. Mikhael, P. Monticciolo, C. Nikias, M. Schetzen, H. Trussell, S. Wilson 和 M. Zoltowski。也要感谢 Dr.

R. Price 建议将劈分 - 基 FFT 算法的内容包含进来和他其他的建议。最后,还要感谢以前的研究生们的建议和意见,尤其是 A. L. Kok, J. Lin 和 S. Srinidhi,他们帮助准备了若干插图和习题答案手册。

John G. Proakis
Dimitris G. Manolakis

目 录

第一章 引言	1
1.1 信号、系统和信号的处理	1
1.1.1 数字信号处理系统的基本组成	3
1.1.2 数字处理系统相对于模拟系统的优势	4
1.2 信号的分类	4
1.2.1 多通道和多维信号	4
1.2.2 连续时间信号和离散时间信号	5
1.2.3 幅值连续信号和幅值离散信号	8
1.2.4 确定信号和随机信号	8
1.3 连续时间信号和离散时间信号中的频率概念	11
1.3.1 连续时间正弦信号	11
1.3.2 离散时间正弦信号	12
1.3.3 谐波相关复指数函数	15
1.4 模数和数模转换	16
1.4.1 模拟信号的取样	17
1.4.2 取样定理	22
1.4.3 连续幅度信号的量化	26
1.4.4 正弦信号的量化	28
1.4.5 量化值的编码	30
1.4.6 数模转换	30
1.4.7 数字信号和系统与离散时间信号和系统的分析	30
1.5 小结与参考文献	31
习题	31
第二章 离散时间信号与系统	35
2.1 离散时间信号	35
2.1.1 一些基本的离散时间信号	36
2.1.2 离散时间信号的分类	39
2.1.3 离散时间信号的简单运算	42
2.2 离散时间系统	45
2.2.1 系统的输入输出描述	45
2.2.2 离散时间系统的框图表示	48
2.2.3 离散时间系统的分类	49
2.2.4 离散时间系统的互联	56
2.3 离散时间线性时不变系统的分析	57

2.3.1	线性系统的分析方法	57
2.3.2	离散时间信号的冲激信号分解	58
2.3.3	LTI 系统对任意输入信号的响应:卷积公式	60
2.3.4	卷积的性质和 LTI 系统的互联	65
2.3.5	因果线性时不变系统	68
2.3.6	线性时不变系统的稳定性	69
2.3.7	具有有限时宽和无限时宽冲激响应的系统	71
2.4	离散时间系统的差分方程描述	72
2.4.1	递归离散时间系统和非递归离散时间系统	72
2.4.2	线性时不变系统的常系数差分方程描述	75
2.4.3	线性常系数差分方程的解	79
2.4.4	线性时不变递归系统的冲激响应	85
2.5	离散时间系统的实现	87
2.5.1	线性时不变系统实现的结构	88
2.5.2	FIR 系统的递归与非递归实现	91
2.6	离散时间信号的相关性	93
2.6.1	互相关序列和自相关序列	94
2.6.2	自相关和互相关序列的性质	96
2.6.3	周期序列的相关性	99
2.6.4	相关序列的计算	103
2.6.5	输入输出的相关函数	103
2.7	小结与参考文献	105
	习题	106
第三章	z 变换及其在 LTI 系统分析中的应用	122
3.1	z 变换	122
3.1.1	z 变换	122
3.1.2	逆 z 变换	129
3.2	z 变换的性质	130
3.3	有理 z 变换	139
3.3.1	零极点	140
3.3.2	因果信号的极点位置和时域特征	143
3.3.3	线性时不变系统的系统函数	147
3.4	逆 z 变换	149
3.4.1	围线积分法	149
3.4.2	幂级数展开法	151
3.4.3	部分分式法	152
3.4.4	有理 z 变换的分解	159
3.5	单边 z 变换	160
3.5.1	定义和性质	160
3.5.2	差分方程的解	163
3.6	线性时不变系统的 z 域分析	165

3.6.1 有理系统函数的系统响应·····	165
3.6.2 非 0 初始条件的零极点系统的响应·····	166
3.6.3 瞬态与稳态响应·····	168
3.6.4 因果性和稳定性·····	169
3.6.5 零极点对消·····	170
3.6.6 多重极点和稳定性·····	172
3.6.7 Schur-Cohn 稳定性判据 ·····	173
3.6.8 二阶系统的稳定性·····	175
3.7 小结与参考文献·····	179
习题 ·····	179
第四章 信号和系统的频率分析 ·····	189
4.1 连续时间信号的频率分析 ·····	189
4.1.1 连续时间周期信号的傅里叶级数·····	190
4.1.2 周期信号的功率谱密度·····	193
4.1.3 连续时间非周期信号的傅里叶变换·····	196
4.1.4 非周期信号的能量谱密度·····	199
4.2 离散时间信号的频率分析 ·····	202
4.2.1 离散时间周期信号的傅里叶级数·····	202
4.2.2 周期信号的功率谱密度·····	204
4.2.3 离散时间非周期信号的傅里叶变换·····	207
4.2.4 傅里叶变换的收敛性·····	209
4.2.5 非周期信号的能量谱密度·····	211
4.2.6 傅里叶变换与 z 变换之间的关系 ·····	216
4.2.7 倒谱·····	217
4.2.8 在单位圆上有极点的信号的傅里叶变换·····	218
4.2.9 取样定理的回顾·····	219
4.2.10 信号的频域分类: 带宽的概念 ·····	227
4.2.11 一些自然信号的频率范围 ·····	230
4.2.12 物理和数学上的二重性 ·····	230
4.3 离散时间信号傅里叶变换的性质 ·····	233
4.3.1 傅里叶变换的对称性·····	233
4.3.2 傅里叶变换定理和性质·····	239
4.4 线性时不变系统的频域特征 ·····	249
4.4.1 复指数和正弦信号的响应: 频率响应函数 ·····	249
4.4.2 正弦输入信号的稳态和瞬态响应·····	257
4.4.3 周期输入信号的稳态响应·····	258
4.4.4 非周期输入信号的响应·····	258
4.4.5 系统函数和频率响应函数的关系·····	260
4.4.6 频率响应函数的计算·····	262
4.4.7 输入输出的相关函数和谐·····	265
4.4.8 随机输入信号的相关函数和功率谱·····	267

4.5 作为滤波器的线性时不变系统	269
4.5.1 理想滤波器特征	270
4.5.2 低通、高通和带通滤波器	272
4.5.3 数字谐振器	278
4.5.4 陷波器	281
4.5.5 梳状滤波器	282
4.5.6 全通滤波器	285
4.5.7 数字正弦振荡器	288
4.6 逆系统和解卷积	289
4.6.1 线性时不变系统的可逆性	290
4.6.2 最小相位、最大相位和混合相位系统	293
4.6.3 系统辨识和解卷积	297
4.6.4 同态解卷积	299
4.7 小结与参考文献	300
习题	301
第五章 离散傅里叶变换:性质与应用	326
5.1 频域取样:离散傅里叶变换	326
5.1.1 频域取样和离散时间信号重构	326
5.1.2 离散傅里叶变换(DFT)	331
5.1.3 DFT与线性变换的关系	334
5.1.4 DFT与其他变换的关系	336
5.2 DFT的性质	338
5.2.1 周期性、线性性和对称性	339
5.2.2 两个DFT的积和循环卷积	343
5.2.3 DFT另外的性质	347
5.3 基于DFT的线性滤波方法	351
5.3.1 DFT在线性滤波中的应用	351
5.3.2 长数据序列的滤波	354
5.4 用DFT做信号频率分析	357
5.5 小结与参考文献	362
习题	362
第六章 DFT的有效计算:快速傅里叶变换算法	370
6.1 DFT的有效计算:FFT算法	370
6.1.1 DFT的直接计算	371
6.1.2 计算DFT的分解征服方法	371
6.1.3 基2FFT算法	376
6.1.4 基4FFT算法	382
6.1.5 劈分-基FFT算法	387
6.1.6 FFT算法的实现	390
6.2 FFT算法的应用	391

6.2.1 两个实序列的 DFT 有效计算	392
6.2.2 $2N$ 点实值序列 DFT 的高效算法	392
6.2.3 FFT 算法在线性滤波和相关分析中的应用	393
6.3 计算 DFT 的线性滤波方法	395
6.3.1 Goertzel 算法	395
6.3.2 线性调频 z 变换算法	396
6.4 在 DFT 计算中的量化效应	400
6.4.1 在直接计算 DFT 中的量化误差	401
6.4.2 在 FFT 算法中的量化误差	402
6.5 小结与参考文献	406
习题	406
第七章 离散时间系统的实现	412
7.1 离散时间系统的实现结构	412
7.2 FIR 系统的结构	413
7.2.1 直接型结构	414
7.2.2 级联型结构	414
7.2.3 频率取样结构	416
7.2.4 格型结构	419
7.3 IIR 系统结构	427
7.3.1 直接型结构	427
7.3.2 信号流图和转置结构	429
7.3.3 级联型结构	432
7.3.4 并行型结构	433
7.3.5 IIR 系统的格型和格梯型实现	436
7.4 状态空间系统分析和结构	443
7.4.1 差分方程所表征系统的状态空间描述	443
7.4.2 状态空间方程的解	446
7.4.3 输入输出描述和状态空间描述之间的关系	447
7.4.4 z 域状态空间分析	453
7.4.5 另外的状态空间结构	455
7.5 数的表示	457
7.5.1 数的定点表示法	458
7.5.2 数的二进制浮点表示法	461
7.5.3 舍入和截尾误差	463
7.6 滤波器系数的量化	466
7.6.1 滤波器系数量化敏感性分析	467
7.6.2 FIR 滤波器的系数量化	474
7.7 数字滤波器中的舍入效应	476
7.7.1 递推系统中的极限环振荡	476
7.7.2 预防上溢的定标	480

7.7.3 数字滤波器定点实现中的量化效应的统计特性	482
7.8 小结与参考文献	488
习题	490
第八章 数字滤波器设计	502
8.1 总的考虑	502
8.1.1 因果关系和它的含义	502
8.1.2 选频滤波器的实际特性	506
8.2 FIR 滤波器设计	507
8.2.1 对称 FIR 滤波器和反对称 FIR 滤波器	507
8.2.2 利用窗函数设计线性相位 FIR 滤波器	510
8.2.3 利用频率取样方法设计线性相位 FIR 滤波器	514
8.2.4 最佳等波纹线性相位 FIR 滤波器的设计	522
8.2.5 FIR 微分器设计	533
8.2.6 Hilbert 变换的设计	536
8.2.7 线性相位 FIR 滤波器设计方法比较	544
8.3 根据模拟滤波器设计 IIR 滤波器	545
8.3.1 用导数逼近设计 IIR 滤波器	546
8.3.2 用冲激不变设计 IIR 滤波器	549
8.3.3 利用双线性变换设计 IIR 滤波器	553
8.3.4 匹配 z 变换	557
8.3.5 通用模拟滤波器的特性	557
8.3.6 基于双线性变换的数字滤波器设计的一些例题	565
8.4 频率变换	568
8.4.1 模拟域频率变换	568
8.4.2 数字域频率变换	570
8.5 基于最小二乘方法的数字滤波器设计	572
8.5.1 Padé 逼近方法	573
8.5.2 最小二乘设计方法	577
8.5.3 FIR 最小二乘逆(Wiener)滤波器	583
8.5.4 IIR 滤波器的频域设计	587
8.6 小结与参考文献	590
习题	593
第九章 信号的取样和重构	602
9.1 带通信号的取样	602
9.1.1 带通信号的表示	602
9.1.2 带通信号取样	605
9.1.3 连续时间信号的离散时间处理	608
9.2 模数转换	609
9.2.1 取样保持	610
9.2.2 量化与编码	611

9.2.3 量化误差分析	614
9.2.4 过取样 A/D 转换器	616
9.3 数字/模拟转换	620
9.3.1 取样和保持	621
9.3.2 一阶保持	624
9.3.3 具有延迟的线性内插	626
9.3.4 过取样 D/A 转换器	629
9.4 小结与参考文献	629
习题	629
第十章 多速率数字信号处理	635
10.1 引言	635
10.2 按因子 D 抽取	636
10.3 按因子 I 内插	639
10.4 按有理因子 I/D 转换取样率	641
10.5 取样率转换的滤波器设计与实现	643
10.5.1 直接型 FIR 滤波器结构	644
10.5.2 多相滤波器结构	647
10.5.3 时变滤波器结构	650
10.6 取样率转换的多级实现	655
10.7 带通信号的取样率转换	658
10.7.1 用频率转换实现抽取和内插	659
10.7.2 抽取和内插的非调制方法	661
10.8 按任意因子的取样率转换	662
10.8.1 一阶近似方法	663
10.8.2 二阶近似方法(线性内插)	665
10.9 多速率信号处理的应用	667
10.9.1 移相器的设计	667
10.9.2 不同取样率数字系统之间的接口技术	668
10.9.3 窄带低通滤波器的实现	669
10.9.4 数字滤波器组的实现	670
10.9.5 语音信号的子带编码	675
10.9.6 直角相移镜像滤波器	677
10.9.7 复用转换器	682
10.9.8 过取样 A/D 和 D/A 转换	684
10.10 小结与参考文献	686
习题	686
第十一章 线性预测和最佳线性滤波器	692
11.1 平稳随机过程的修正表示	692
11.1.1 有理功率谱	694
11.1.2 滤波器参数和自相关序列之间的关系	695

11.2	前向和后向线性预测	696
11.2.1	前向线性预测	696
11.2.2	后向线性预测	698
11.2.3	格型前向和后向预测器的最佳反射系数	701
11.2.4	AR 过程与线性预测的关系	702
11.3	正规方程的解	702
11.3.1	Levinson-Durbin 算法	703
11.3.2	Schür 算法	706
11.4	线性预测误差滤波器的性质	710
11.5	AR 格型和 ARMA 格 - 梯型滤波器	713
11.5.1	AR 格型结构	713
11.5.2	ARMA 过程和格 - 梯型滤波器	714
11.6	用于滤波和预测的 Wiener 滤波器	716
11.6.1	FIR Wiener 滤波器	717
11.6.2	线性均方估计中的正交性原理	719
11.6.3	IIR Wiener 滤波器	720
11.6.4	非因果 Wiener 滤波器	724
11.7	小结与参考文献	726
	习题	727
第十二章	功率谱估计	731
12.1	信号的有限时观测值的谱估计	731
12.1.1	能量密度谱的计算	731
12.1.2	随机信号的自相关和功率谱估计:周期图法	735
12.1.3	DFT 在功率谱估计中的应用	739
12.2	功率谱估计的非参数方法	741
12.2.1	Bartlett 方法:平均周期图	741
12.2.2	Welch 方法:修正的平均周期图	742
12.2.3	Blackman 和 Tukey 方法:平滑周期图	744
12.2.4	非参数功率谱估计方法的性能特点	746
12.2.5	非参数功率谱估计的计算需求	749
12.3	功率谱估计的参数方法	750
12.3.1	自相关和模型参数之间的联系	751
12.3.2	AR 模型参数的 Yule-Walker 方法	753
12.3.3	AR 模型参数的 Burg 方法	754
12.3.4	AR 模型参数的无约束最小二乘方法	756
12.3.5	AR 模型参数的序贯估计方法	757
12.3.6	AR 模型阶的选取	758
12.3.7	功率谱估计的 MA 模型	759
12.3.8	功率谱估计的 ARMA 模型	760
12.3.9	一些实验结果	762
12.4	最小方差谱估计	769

12.5 谱估计的特征分析方法.....	770
12.5.1 Pisarenko 谐波分解方法	771
12.5.2 自相关矩阵的特征分解	773
12.5.3 MUSIC 算法	775
12.5.4 ESPRIT 算法	775
12.5.5 阶次选取准则	778
12.5.6 实验结果	779
12.6 小结与参考文献	781
习题	781
附录 A 随机信号、相关函数和功率谱	790
附录 B 随机数发生器.....	798
附录 C 线性相位 FIR 滤波器设计的过渡系数表.....	802
附录 D MATLAB 函数清单	808
参考文献与参考书目.....	813

第一章 引言

数字信号处理是近 30 年快速发展起来的科学和工程领域。导致它快速发展的直接原因就是数字计算机技术的突破和集成电路制造技术的兴起。30 年前的数字计算机和与之相应的硬件设备体积非常巨大,价格也很昂贵,这就使它的应用局限于一般的非实时科学计算和商业领域。随着中规模集成电路(MSI),进而是大规模集成电路(LSI),现在是超大规模集成电路(VLSI)的发展,导致了数字计算机专用性数字硬件的革命性进步,现在的计算机变得强大、小巧、廉价、快速。这些廉价高速的数字电路能构造出执行更复杂的数字信号处理的功能和任务的数字系统,这些功能和任务要是用模拟系统来完成是非常困难的,或者代价太高以致无法完成。因此,很多以前不得不用模拟系统实现的信号处理的任务现在大都转到用更低廉,更可靠的数字系统来实现。

当然我们并不是说对于所有的信号处理任务来讲,数字信号处理都是最好的解决方案。事实上,对于许多带宽非常宽的信号来说,实时处理是一个关键的问题,对于这种信号,模拟系统或者甚至光信号处理系统是惟一可行的解决方案。然而,如果数字电路有足够的速度来进行处理的话,一般来说,数字信号处理系统是更为可取的方案。

对于信号处理来说,数字系统除了具有价格上的优势和性能可靠的特点,还具有一些别的优点。具体来说,数字处理硬件允许可编程操作。通过软件编程,我们可以更加容易地改变用硬件实现的信号处理功能,这样数字硬件和相应的软件在系统设计上就更加灵活。并且,比起模拟电路和模拟信号处理系统来说,数字信号处理系统能获得更高的精度等级。出于以上这些原因,在过去的 30 年里,数字信号处理的理论及其应用获得了飞速的发展。

这本书的目的是介绍一些数字信号处理基本的分析工具和相关的技术。一开始我们会先介绍一些必要的术语,以及一些把模拟信号转换成可处理的数字信号的实现方法。就像我们将要看到的那样,模拟信号的数字化还存在着一些不足,第一,模拟信号数字化涉及到对信号的取样以及对取样值的量化,由于取样和量化带来的失真使得我们不可能从数字信号中原原本本地恢复出原来的模拟信号,但是这种失真可以通过适当地选取取样频率和量化精度来控制。第二,在数字信号处理系统中必须考虑量化带来的有限精度效应。本书将比较详细地考虑这些方面的问题,但本书的重点集中在数字信号处理系统的分析和设计以及计算机实现上。

1.1 信号、系统和信号处理

信号可以看成是一个随时间、空间或者任何其他独立变量或变量变化的物理量。从数学上讲,我们可以把信号看成一个函数,这个函数可以有一个变量,也可以有多个独立的变量。例如下面的两个函数

$$s_1(t) = 5t$$

$$s_2(t) = 20t^2 \quad (1.1.1)$$

描述了两个信号,第一个随时间 t 线性变化,第二个随 t 的平方变化。再看一个函数的例子:

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

这个函数有两个独立的变量 x 和 y ,可以看成是一个平面上的两个空间坐标。

式(1.1.1)和式(1.1.2)描述的两个信号属于一类信号,它们由函数表达式精确地定义。然而在某些场合信号的函数关系是未知的或者过于复杂以致于即使知道了也没什么实际的用处。

例如,说话时的语音信号(图 1.1)就不能像式(1.1.1)那样精确地用函数表达式来描述。一般来说,一段语音信号可以用几个不同幅值和频率的正弦函数的叠加来近似地表示。就像下式

$$\sum_{i=1}^N A_i(t) \sin[2\pi F_i(t)t + \theta_i(t)] \quad (1.1.3)$$

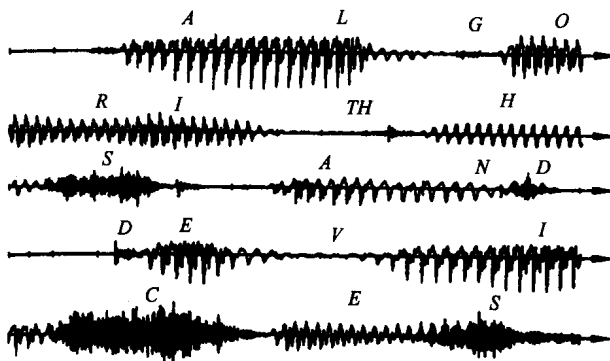


图 1.1 语音信号示例

这里的 $\{A_i(t)\}$ 、 $\{F_i(t)\}$ 、 $\{\theta_i(t)\}$ 分别代表正弦函数的幅度、频率和相位的集合(可能是时变的)。实际上,一段时间的语音信号所传递的内容或信息就可以通过测量出这段时间内信号的幅度、频率和相位来获知。

再举一个自然信号的例子,例如心电图(ECG)。它将病人心脏的状况提供给医生。同样的,脑电图(EEG)信号提供了病人的大脑的状况。

语音、心电图、脑电图信号这些携带了信息的自然信号可以进一步演化成一些具有独立变量的函数,这个变量就是时间。另一个具有两个独立变量的函数的例子就是图像信号,这两个独立的变量就是空间的坐标。这种自然产生的信号的例子是非常多的。

与这些信号相关的是这些信号产生的方法。语音信号产生的方法是因为气流流过声带,图像信号可以由胶片曝光产生。这些信号的产生都可以看做是一个系统对外界的激励产生的响应的结果。在语音信号产生过程中,系统包括声带和声道(也叫声腔)。与系统一起的外界激励称为信号源。这样我们就有了语音源、图像源以及各种其他的信号源。

一个系统也可以定义为能对信号产生作用的物理器件。一个能滤除噪声和干扰的滤波器也可以称为一个系统。这时滤波器对信号产生的作用就是减小或滤除信号的噪声和干扰。