

国外电子与通信教材系列

数字信号处理

——原理、算法与应用（第五版）

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

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

余翔宇 刘琲贝 马碧云 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书全面系统地阐述了离散时间信号、系统和现代数字信号处理的基本原理。全书共 15 章，内容包括绪论、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、离散傅里叶变换的性质和应用、DFT 的高效计算：FFT 算法、离散时间系统的实现、数字滤波器设计、多采样率数字信号处理、多采样率数字滤波器组和小波、线性预测与最优线性滤波器、自适应滤波器和功率谱估计。全书理论联系实际，并且提供了大量精心设计的习题。

本书可作为电子工程、计算机工程、计算机科学、地球物理、气象、生物医学工程、遥感等学科高年级本科生与研究生一学期或两学期离散系统和数字信号处理的教材，也可供其他科技人员参考。

Authorized translation from the English language edition, entitled Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications, Fifth Edition by John G. Proakis, Dimitris G. Manolakis, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2022 by Pearson Education, Inc.

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

CHINESE SIMPLIFIED language edition published by PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY, CO., LTD., Copyright © 2023.

本书中文简体字版专有版权由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：01-2022-3548

图书在版编目（CIP）数据

数字信号处理：原理、算法与应用：第五版/（美）约翰·G. 普罗克斯（John G. Proakis），（美）迪米特里·G. 马诺莱克斯（Dimitris G. Manolakis）著；余翔宇等译. —北京：电子工业出版社，2023.5

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

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-45466-0

I. ①数… II. ①约… ②迪… ③余… III. ①数字信号处理—高等学校—教材 IV. ①TN911.72

中国国家版本馆 CIP 数据核字（2023）第 068911 号

责任编辑：谭海平

印 刷：

装 订：

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：787×1 092 1/16 印张：47.5 字数：1372.5 千字

版 次：2013 年 6 月第 1 版（原著第 4 版）

2023 年 5 月第 2 版（原著第 5 版）

印 次：2023 年 5 月第 1 次印刷

定 价：139.00 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）88254888，88258888。

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。

本书咨询联系方式：（010）88254552，tan02@phei.com.cn。

译者序

John G. Proakis 教授是信息与通信领域的国际知名学者，其编著的《数字通信》是该领域的经典教材。John G. Proakis 教授与 Dimitris G. Manolakis 教授合作编著的《数字信号处理——原理、算法与应用》在信号处理领域也具有巨大的影响力，该书第三版的英文版最早由中国电力出版社于 2004 年引入国内，随后电子工业出版社于 2007 年出版了该书第四版的英文版。目前，该书已更新至第五版，电子工业出版社也第一时间将该书引入国内，及时向国内读者分享作者的最新成果。感谢电子工业出版社的邀请，使我们有幸能够成为该书的译者，历经前后近两年的翻译，本书终于在 2023 年上半年面世，得以供广大读者学习参考。

本书翻译的工作由余翔宇组织，刘琲贝老师初译了第 12 章，马碧云老师初译了全书的习题、计算机习题和部分例题，其他部分均由余翔宇初译并最终统稿。余伯庸先生协助完成了译稿的排版、公式的录入等烦杂工作。梅雨婷、褚泽晖和叶晓晖等同学试读了本书的初译稿，给出了不少修改建议。在翻译过程中，对部分疑惑通过电子邮件与 John G. Proakis 教授进行了讨论，在得到及时回复的同时，修正了目前发现的所有问题。

本书的翻译工作得到了华南理工大学 2022 年度本科精品教材专项建设项目的支持，并且得到了华南理工大学电子与信息学院领导与相关院系同事的帮助，电子工业出版社的编辑为本书的出版付出了辛勤的劳动，在此一并表示感谢。

由于译者水平有限，书中疏漏及错误在所难免，欢迎各位读者批评指正。

前 言

本书是在我们过去几年“数字信号处理”本科生和研究生课程教学的基础上编写的，内容包括离散时间信号、系统和现代数字信号处理的基本原理，读者对象是电子工程、计算机工程、计算机科学、地球物理、气象等学科的学生，既适合一学期或两学期“离散系统和数字信号处理”的本科生课程，又适合一学期“数字信号处理”的一年级研究生课程。

我们假设学生修习了高级微积分（包括常微分方程）和连续时间信号线性系统的本科生课程，包括拉普拉斯变换的介绍。书中的第4章介绍了周期和非周期信号的傅里叶级数与傅里叶变换，但我们预计许多学生可能在之前的课程中学过这些内容。学习第13章至第15章时，事先了解一些概率和随机过程的知识会有所帮助。全书理论联系实际，并且提供了大量精心设计的习题。

第五版中增加了关于多采样率数字滤波器组和小波的新章节，修改了现有的章节，增加了几个新主题，包括短时傅里叶变换、稀疏快速傅里叶变换（FFT）算法、ARMA 模型参数估计和混响滤波器。

第1章的内容包括数字信号处理系统的基本原理、数字信号处理相对于模拟信号处理的优势、信号的分类。

第2章的内容包括时域线性时不变（移不变）离散时间系统和离散时间信号的特征与分析，卷积和的推导，根据冲激响应的持续时间将系统分类为有限冲激响应（FIR）和无限冲激响应（IIR），由常系数差分方程描述的线性时不变（LTI）系统，LTI 系统在信号平滑中的应用，以及离散时间相关性。

第3章的内容包括 z 变换、双边 z 变换和单边 z 变换，逆 z 变换的方法， z 变换在线性时不变系统分析中的应用，以及系统的重要性质（如因果性和稳定性都与 z 域特性有关）。

第4章的内容包括频域中的信号分析，连续时间信号和离散时间信号中频率的概念，连续时间信号和离散时间信号的傅里叶级数与傅里叶变换。

第5章的内容包括LTI 离散系统的频域表征，周期信号和非周期信号的响应，多种类型的离散时间系统（包括谐振器、陷波器、梳状滤波器、全通滤波器和振荡器），一些简单的FIR 和IIR 滤波器的设计，最小相位、混合相位和最大相位系统的概念以及反卷积问题。

第6章的内容包括连续时间信号的采样和从其样本重建信号，带通信号的采样和重建，离散时间信号的采样，模数（A/D）和数模（D/A）转换，过采样A/D 和D/A 转换器的处理。

第7章的内容包括离散傅里叶变换（DFT）及其性质和应用，使用DFT 进行线性滤波的两种方法，使用DFT 执行信号的频率分析，短时傅里叶变换，离散余弦变换。

第8章的内容包括DFT 的有效计算，基2、基4 和分裂基快速傅里叶变换（FFT）算法，FFT 算法在卷积和相关计算中的应用，使用线性滤波计算DFT 的两种方法（戈泽尔算法和调频 z 变换），稀疏FFT 算法。

第9章的内容包括IIR 和FIR 系统的实现（直接型、级联型、并联型、格型和格梯型实现），FIR 和IIR 系统数字实现中的量化效应。

第10章的主要内容包括数字FIR 和IIR 滤波器的设计方法（离散时间的直接方法和通过各种变换将模拟滤波器转换为数字滤波器的方法）。

第 11 章的内容包括采样率转换及其在多采样率数字信号处理中的应用, 包括通过整数和有理因子描述抽取和插值, 通过任意因子进行采样率转换的方法, 通过多相滤波器结构实现的方法。

第 12 章的内容包括多采样率数字滤波器组和小波, 双通道正交镜像滤波器 (QMF) 组和多通道滤波器组, 双通道和多通道滤波器组的 FIR 滤波器的设计, 小波和离散小波变换, 离散小波变换的构造以及小波和滤波器组之间的联系。

第 13 章的内容包括线性预测和最佳线性 (维纳) 滤波器, 求解正规方程的 Levinson-Durbin 算法, AR 格型和 ARMA 格梯型滤波器。

第 14 章的内容包括基于 LMS 算法和递归最小二乘 (RLS) 算法的单通道自适应滤波器, 直接型 FIR 和格型 RLS 算法以及滤波器结构。

第 15 章的内容包括功率谱估计 [非参数和基于模型 (参数) 的方法], 基于特征分解的方法 (包括 MUSIC 和 ESPRIT)。对于之前接触过离散系统的学生, 可以快速复习第 1 章到第 5 章, 然后学习第 6 章到第 10 章, 这是一学期的高级课程。

对于数字信号处理的一年级研究生课程, 前六章回顾了离散时间系统。学生可以快速阅读这些章节, 然后学习第 7 章至第 11 章, 接着学习第 12 章至第 15 章中的选定主题。书中包含了大量的例子, 提供了 500 多道习题, 包括计算机习题, 且提供部分习题答案。计算机习题可以使用 MATLAB 或 Python 的软件包进行数值求解。包含大量习题解答的 *Student Manual for Digital Signal Processing with MATLAB* 可在 www.pearsonhighered.com/engineering-resources 处找到。



部分习题答案

感谢如下同事对本书的评阅和建议: 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; 感谢以下教员审阅本书的第四版并对新版的编写提出建议: D. Bukofzer、A. Dogandzic、E. Doering、E. Greco、R. Jordan、D. Krusienski、H. Lev-Ari、S. Nelatury 和 M. Azimi-Sadjadi; 感谢 H. Lev-Ari 和 T. Q. Nguyen 准备和审阅了关于滤波器组和小波的新内容; 感谢 C. Nikias 准备了 15.6.6 节中的数值结果。最后, 感谢我们的研究生 A. L. Kok、J. Lin、E. Sozer、S. Srinidhi、Z. Li 和 Y. Xiang 协助绘制了几幅插图及编写了习题解答手册。

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 数字信号处理相对于模拟信号处理的优势	3
1.2 信号的分类	4
1.2.1 多通道信号与多维信号	4
1.2.2 连续时间信号与离散时间信号	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	7
1.3 小结	8
习题	8
第 2 章 离散时间信号与系统	9
2.1 离散时间信号	9
2.1.1 一些基本的离散时间信号	10
2.1.2 离散时间信号的分类	12
2.1.3 离散时间信号的简单操作	14
2.2 离散时间系统	17
2.2.1 系统的输入-输出描述	17
2.2.2 离散时间系统的框图表示	19
2.2.3 离散时间系统的分类	21
2.2.4 离散时间系统的互连	25
2.3 离散时间线性时不变系统的分析	26
2.3.1 分析线性系统的技术	26
2.3.2 将离散时间信号分解为冲激	27
2.3.3 线性时不变系统对任意输入的响应：卷积和	29
2.3.4 卷积的性质和线性时不变系统的互连	33
2.3.5 因果线性时不变系统	35
2.3.6 线性时不变系统的稳定性	37
2.3.7 具有有限长与无限长冲激响应的系统	38
2.4 由差分方程描述的离散时间系统	39
2.4.1 递归与非递归离散时间系统	39
2.4.2 由常数差分方程描述的线性时不变系统	42
2.4.3 线性时不变系统在信号平滑中的应用	45
2.5 离散时间系统的实现	47
2.5.1 线性时不变系统的实现结构	47
2.5.2 FIR 系统的递归与非递归实现	51
2.6 离散时间信号的相关	52

2.6.1	互相关与自相关序列	53
2.6.2	自相关与互相关序列的性质	55
2.6.3	周期序列的相关	57
2.6.4	输入-输出相关序列	59
2.7	小结	60
	习题	61
	计算机习题	68
第3章	z 变换及其在 LTI 系统分析中的应用	71
3.1	z 变换	71
3.1.1	正 z 变换	71
3.1.2	逆 z 变换	76
3.2	z 变换的性质	77
3.3	有理 z 变换	85
3.3.1	极点与零点	85
3.3.2	因果信号的极点位置和时域性质	87
3.3.3	线性时不变系统的系统函数	90
3.4	逆 z 变换	92
3.4.1	围线积分法求逆 z 变换	92
3.4.2	幂级数展开法求逆 z 变换	93
3.4.3	部分分式展开法求逆 z 变换	94
3.4.4	有理 z 变换的分解	100
3.5	在 z 域中分析线性时不变系统	101
3.5.1	有理系统函数的系统响应	101
3.5.2	瞬态响应和稳态响应	102
3.5.3	因果性与稳定性	103
3.5.4	零极点抵消	104
3.5.5	多阶极点和稳定性	105
3.5.6	二阶系统的稳定性	106
3.6	单边 z 变换	108
3.6.1	定义和性质	108
3.6.2	差分方程的解	111
3.6.3	具有非零初始条件的零极点系统的响应	112
3.7	小结	113
	习题	114
	计算机习题	119
第4章	信号的频率分析	121
4.1	连续时间信号和离散时间信号中频率的概念	121
4.1.1	连续时间正弦信号	121
4.1.2	离散时间正弦信号	122
4.1.3	谐波相关复指数信号	124
4.1.4	模拟信号的采样	126

4.1.5	采样定理	129
4.2	连续时间信号的频率分析	132
4.2.1	连续时间周期信号的傅里叶级数	133
4.2.2	周期信号的功率密度谱	135
4.2.3	连续时间非周期信号的傅里叶变换	138
4.2.4	非周期信号的能量密度谱	141
4.3	离散时间信号的频率分析	143
4.3.1	离散时间周期信号的傅里叶级数	143
4.3.2	周期信号的功率密度谱	145
4.3.3	离散时间非周期信号的傅里叶变换	148
4.3.4	傅里叶变换的收敛	149
4.3.5	非周期信号的能量密度谱	151
4.3.6	傅里叶变换与 z 变换的关系	154
4.3.7	倒谱	156
4.3.8	单位圆上有极点的信号的傅里叶变换	157
4.3.9	信号的频域分类: 带宽的概念	158
4.3.10	一些自然信号的频率范围	160
4.4	频域与时域的信号性质	161
4.5	离散时间信号的傅里叶变换性质	163
4.5.1	傅里叶变换的对称性质	163
4.5.2	傅里叶变换的定理和性质	168
4.6	小结	175
	习题	175
	计算机习题	180

第5章	LTI系统的频域分析	182
5.1	LTI系统的频域特性	182
5.1.1	对复指数和正弦信号的响应: 频率响应函数	182
5.1.2	正弦输入信号的稳态与瞬态响应	188
5.1.3	周期输入信号的稳态响应	188
5.1.4	非周期输入信号的稳态响应	189
5.2	LTI系统的频率响应	190
5.2.1	具有有理系统函数的系统的频率响应	190
5.2.2	频率响应函数的计算	192
5.3	LTI系统输出端的相关函数和谱	195
5.4	作为频率选择滤波器的LTI系统	197
5.4.1	理想滤波器特性	197
5.4.2	低通、高通与带通滤波器	199
5.4.3	数字谐振器	203
5.4.4	陷波器	205
5.4.5	梳状滤波器	207
5.4.6	混响滤波器	209
5.4.7	全通滤波器	211

5.4.8 数字正弦振荡器	213
5.5 逆系统与去卷积	215
5.5.1 LTI 系统的可逆性	215
5.5.2 最小相位、最大相位和混合相位系统	218
5.5.3 系统辨识和去卷积	220
5.5.4 同态去卷积	222
5.6 小结	223
习题	223
计算机习题	231
第 6 章 信号的采样与重建	236
6.1 连续时间信号的理想采样和重建	236
6.2 连续时间信号的离散时间处理	244
6.3 连续时间带通信号的采样和重建	249
6.3.1 均匀或一阶采样	249
6.3.2 交织或非均匀二阶采样	253
6.3.3 带通信号表示	257
6.3.4 使用带通信号表示采样	260
6.4 离散时间信号的采样	260
6.4.1 离散时间信号的采样和内插	260
6.4.2 带通离散时间信号的表示和采样	264
6.5 模数转换器和数模转换器	265
6.5.1 模数转换器	265
6.5.2 量化与编码	266
6.5.3 量化误差分析	269
6.5.4 数模转换器	270
6.6 过采样模数转换器和数模转换器	271
6.6.1 过采样模数转换器	271
6.6.2 过采样数模转换器	276
6.7 小结	277
习题	277
计算机习题	281
第 7 章 离散傅里叶变换的性质和应用	284
7.1 频域采样: DFT	284
7.1.1 离散时间信号的频域采样与重建	284
7.1.2 离散傅里叶变换 (DFT)	287
7.1.3 DFT 是线性变换	290
7.1.4 DFT 与其他变换的关系	291
7.2 DFT 的性质	294
7.2.1 周期性、线性和对称性	294
7.2.2 两个 DFT 的相乘和圆周卷积	298
7.2.3 DFT 的其他性质	302

7.3 基于 DFT 的线性滤波方法	305
7.3.1 在线性滤波中使用 DFT	305
7.3.2 长数据序列滤波	308
7.4 使用 DFT 对信号进行频率分析	310
7.5 短时傅里叶变换	315
7.6 离散余弦变换	317
7.6.1 正 DCT	318
7.6.2 逆 DCT	319
7.6.3 DCT 作为正交变换	320
7.7 小结	322
习题	323
计算机习题	325
第 8 章 DFT 的高效计算: FFT 算法	328
8.1 DFT 的高效计算: FFT 算法	328
8.1.1 直接计算 DFT	328
8.1.2 分治法计算 DFT	329
8.1.3 基 2 快速傅里叶变换算法	333
8.1.4 基 4 快速傅里叶变换算法	339
8.1.5 分裂基 FFT 算法	343
8.1.6 FFT 算法的实现	346
8.1.7 稀疏 FFT 算法	347
8.2 FFT 算法的应用	347
8.2.1 高效计算两个实序列的 DFT	347
8.2.2 高效计算 $2N$ 点实序列的 DFT	348
8.2.3 在线性滤波和相关中使用 FFT 算法	349
8.3 计算 DFT 的线性滤波方法	350
8.3.1 戈泽尔算法	350
8.3.2 调频 z 变换算法	351
8.4 DFT 计算中的量化效应	355
8.4.1 直接计算 DFT 时的量化误差	355
8.4.2 FFT 算法中的量化误差	356
8.5 小结	359
习题	359
计算机习题	362
第 9 章 离散时间系统的实现	364
9.1 离散时间系统的实现结构	364
9.2 FIR 系统的结构	365
9.2.1 直接型结构	365
9.2.2 级联型结构	366
9.2.3 频率采样结构	368
9.2.4 格型结构	371

9.3	IIR 系统的结构	377
9.3.1	直接型结构	377
9.3.2	信号流图和转置结构	379
9.3.3	级联型结构	382
9.3.4	并联型结构	383
9.3.5	IIR 系统的格型结构和格梯型结构	385
9.4	数的表示	390
9.4.1	数的定点表示	390
9.4.2	数的二进制浮点表示	393
9.4.3	舍入和截尾导致的误差	394
9.5	滤波器系数的量化	397
9.5.1	滤波器系数量化灵敏度分析	397
9.5.2	FIR 滤波器中系数的量化	403
9.6	数字滤波器中的舍入效应	405
9.6.1	递归系统中的极限环振荡	405
9.6.2	缩放以防止溢出	408
9.6.3	数字滤波器的定点实现中量化效应的统计描述	409
9.7	小结	415
	习题	416
	计算机习题	423
第 10 章	数字滤波器设计	424
10.1	概论	424
10.1.1	因果性及其含义	424
10.1.2	实际频率选择性滤波器的特性	427
10.2	FIR 滤波器的设计	428
10.2.1	对称和反对称 FIR 滤波器	428
10.2.2	用窗函数设计线性相位 FIR 滤波器	430
10.2.3	采用频率采样法设计线性相位 FIR 滤波器	434
10.2.4	设计最优等纹波线性相位 FIR 滤波器	438
10.2.5	FIR 微分器的设计	446
10.2.6	设计希尔伯特变换器	450
10.2.7	线性相位 FIR 滤波器设计方法的比较	453
10.3	由模拟滤波器设计 IIR 滤波器	453
10.3.1	基于导数逼近的 IIR 滤波器设计	454
10.3.2	基于冲激不变的 IIR 滤波器设计	457
10.3.3	基于双线性变换的 IIR 滤波器设计	460
10.3.4	常用模拟滤波器的特性	463
10.3.5	基于双线性变换设计数字滤波器的例子	470
10.4	频率变换	473
10.4.1	模拟域中的频率变换	473
10.4.2	数字域中的频率变换	474
10.5	小结	476

习题	476
计算机习题	479
第 11 章 多采样率数字信号处理	484
11.1 引言	484
11.2 以因子 D 抽取	487
11.3 以因子 I 内插	490
11.4 以有理因子 I/D 转换采样率	492
11.5 采样率转换的实现	494
11.5.1 多相滤波器结构	494
11.5.2 互换滤波器与下采样器/上采样器	496
11.5.3 使用级联积分梳状滤波器转换采样率	497
11.5.4 用于抽取和内插滤波器的多相结构	498
11.5.5 用于有理采样率转换的结构	501
11.6 采样率转换的多级实现	501
11.7 带通信号的采样率转换	504
11.8 以任意因子转换采样率	505
11.8.1 使用多相内插器的任意重采样	506
11.8.2 使用 Farrow 滤波器结构的任意重采样	506
11.9 多采样率信号处理的应用	507
11.9.1 设计移相器	507
11.9.2 不同采样率数字系统的对接	508
11.9.3 窄带低通滤波器的实现	509
11.9.4 语音信号子带编码	510
11.10 小结	511
习题	512
计算机习题	515
第 12 章 多采样率数字滤波器组和小波	517
12.1 多采样率数字滤波器组	517
12.1.1 DFT 滤波器组	518
12.1.2 均匀 DFT 滤波器组的多相结构	520
12.1.3 均匀 DFT 滤波器组的另一种结构	522
12.2 双通道 QMF 组	524
12.2.1 消除混叠效应	525
12.2.2 QMF 组的多相结构	526
12.2.3 完全重建的条件	527
12.2.4 线性相位 FIR QMF 组	528
12.2.5 IIR QMF 组	530
12.2.6 在双通道 FIR 正交镜像滤波器组中完全重建	530
12.2.7 双通道仿酉 QMF 组	534
12.2.8 正交和双正交双通道 FIR 滤波器组	536
12.2.9 子带编码中的双通道 QMF 组	538

12.3	M 通道滤波器组	539
12.3.1	M 通道滤波器组的多相结构	540
12.3.2	M 通道仿酉滤波器组	542
12.4	小波和小波变换	544
12.4.1	理想带通小波分解	545
12.4.2	信号空间与小波	549
12.4.3	多分辨率分析和小波	551
12.4.4	离散小波变换	553
12.5	从小波到滤波器组	558
12.5.1	膨胀公式	558
12.5.2	正交条件	558
12.5.3	正交性和膨胀公式的含义	559
12.6	从滤波器组到小波	560
12.7	正则滤波器和小波	562
12.8	小结	565
	习题	566
	计算机习题	569
第 13 章	线性预测与最优线性滤波器	570
13.1	随机信号、相关函数和功率谱	570
13.1.1	随机过程	570
13.1.2	平稳随机过程	571
13.1.3	统计(集合)平均	571
13.1.4	联合随机过程的统计平均	572
13.1.5	功率密度谱	573
13.1.6	离散时间随机信号	574
13.1.7	离散时间随机过程的时间平均	575
13.1.8	均值各态历经过程	575
13.1.9	相关各态历经过程	576
13.1.10	LTI 系统的随机输入信号的相关函数和功率谱	576
13.2	平稳随机过程的新息表示	578
13.2.1	有理功率谱	580
13.2.2	滤波器参数与自相关序列之间的关系	581
13.3	正向和反向线性预测	582
13.3.1	正向线性预测	582
13.3.2	反向线性预测	584
13.3.3	格型正向和反向预测器的最优反射系数	586
13.3.4	AR 过程和线性预测的关系	586
13.4	正规方程的解	587
13.4.1	Levinson-Durbin 算法	587
13.5	线性预测误差滤波器的性质	589
13.6	AR 格型和 ARMA 格梯型滤波器	592
13.6.1	AR 格型结构	592

13.6.2	ARMA 过程与格梯型滤波器	593
13.7	用于滤波和预测的维纳滤波器	595
13.7.1	FIR 维纳滤波器	595
13.7.2	线性均方估计的正交性原理	597
13.7.3	IIR 维纳滤波器	598
13.7.4	非因果维纳滤波器	600
13.8	小结	601
	习题	602
	计算机习题	605
第 14 章	自适应滤波器	608
14.1	自适应滤波器的应用	608
14.1.1	系统辨识或系统建模	609
14.1.2	自适应信道均衡	610
14.1.3	宽带信号中窄带干扰的抑制	612
14.1.4	自适应线谱增强器	615
14.1.5	自适应噪声消除	616
14.1.6	自适应阵列	616
14.2	自适应直接型 FIR 滤波器——最小均方 (LMS) 算法	618
14.2.1	最小均方误差准则	618
14.2.2	最小均方算法	620
14.2.3	相关的随机梯度算法	621
14.2.4	最小均方算法的性质	622
14.3	自适应直接型滤波器——递归最小二乘 (LMS) 算法	627
14.3.1	RLS 算法	627
14.3.2	LDU 分解和平方根算法	630
14.3.3	快速 RLS 算法	632
14.3.4	直接型 RLS 算法的性质	634
14.4	自适应格梯型滤波器	635
14.4.1	RLS 格梯型算法	635
14.4.2	其他格型算法	652
14.4.3	格梯型算法的性质	652
14.5	自适应滤波器算法的稳定性与鲁棒性	655
14.6	小结	655
	习题	656
	计算机习题	658
第 15 章	功率谱估计	662
15.1	由有限长观测信号估计谱	662
15.1.1	计算能量密度谱	662
15.1.2	估计随机信号的自相关和功率谱: 周期图	666
15.1.3	在功率谱估计中使用 DFT	669
15.2	功率谱估计的非参数方法	670

15.2.1	巴特利特方法：对周期图平均	670
15.2.2	Welch 方法：平均改进的周期图	671
15.2.3	Blackman 和 Tukey 方法：平滑周期图	673
15.2.4	非参数功率谱估计器的性能	675
15.2.5	非参数功率谱估计的计算需求	677
15.3	功率谱估计的参数方法	678
15.3.1	自相关和模型参数之间的关系	679
15.3.2	AR 模型参数的 Yule-Walker 方法	681
15.3.3	AR 模型参数的 Burg 方法	681
15.3.4	AR 模型参数的无约束最小二乘方法	683
15.3.5	AR 模型参数的序贯估计方法	684
15.3.6	选择 AR 模型的阶	685
15.3.7	功率谱估计的 MA 模型	686
15.3.8	功率谱估计的 ARMA 模型	687
15.3.9	一些实验结果	688
15.4	ARMA 模型参数估计	695
15.5	功率谱估计的滤波器组方法	699
15.5.1	周期图的滤波器组实现	699
15.5.2	最小方差谱估计	701
15.6	谱估计的特征分析算法	703
15.6.1	Pisarenko 谐波分解方法	704
15.6.2	白噪声中正弦信号的自相关矩阵的特征分解	705
15.6.3	多信号分类算法	707
15.6.4	ESPRIT 算法	708
15.6.5	阶选择准则	710
15.6.6	实验结果	710
15.7	小结	712
	习题	713
	计算机习题	719
	附录 A 随机数生成器	720
	附录 B 设计线性相位 FIR 滤波器的过渡系数表	723
	参考文献和参考书目	727
	索引	739

第1章 绪 论

数字信号处理是在过去五十年中快速发展的科学和工程领域之一，而这要归因于数字计算机技术与集成电路制造取得的重要进展。五十年前的数字计算机和相关数字硬件，体积相对庞大且价格昂贵，其应用仅限于非实时（离线）科学计算和商业领域。从**中规模集成电路**（Medium-Scale Integration, MSI）到**大规模集成电路**（Large-Scale Integration, LSI），再到现在的**超大规模集成电路**（Very-Large-Scale Integration, VLSI），集成电路技术的迅猛发展促进了功能强大的、体积更小的、速度更快的、价格更便宜的数字计算机和专用数字硬件技术的发展。这些便宜且相对快速的数字电路，使得构建执行复杂数字信号处理功能与任务的尖端数字系统成为可能，而这些任务通常过于复杂且开销很大，以致无法由模拟电路或模拟信号处理系统来实现。因此，很多传统上由模拟方法实现的信号处理任务，如今都可由廉价且可靠的数字硬件来实现。

这里并不是说数字信号处理适用于所有信号处理问题。事实上，带宽极宽的许多信号需要实时处理。对于这类信号，模拟信号处理或者光信号处理是唯一可行的处理方法。然而，对于存在数字电路且速度快到足以进行信号处理的场合，通常要优先考虑使用数字电路。

除了能够产生更廉价、更可靠的系统进行信号处理，数字电路还有其他一些优点，特别是数字处理硬件允许可编程操作。借助于软件，人们可以更容易地修改由硬件实现的信号处理功能。因此，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，与模拟电路和模拟信号处理系统相比，采用数字硬件与软件通常可以实现更高的精度。基于上述原因，在过去的五十年里，数字信号处理理论与应用取得了爆炸性增长。

本书介绍处理数字信号的基本分析工具和技术，重点介绍数字信号处理系统以及计算技术方面的分析与设计。

1.1 信号、系统及信号处理

信号定义为随时间、空间或其他自变量变化而变化的物理量。数学上，信号描述为一个或多个自变量的函数。例如，函数

$$s_1(t) = 5t, \quad s_2(t) = 20t^2 \quad (1.1.1)$$

描述了两个信号，前者随自变量 t （时间）线性变化，后者随 t 的二次方变化。又如，函数

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

描述了一个有两个自变量 x 与 y 的信号，其中 x 与 y 可以表示平面上的两个空间坐标。

由式（1.1.1）和式（1.1.2）描述的信号属于这样一类信号——这类信号是通过指定自变量的函数依赖关系来准确定义的。然而，在某些情况下，这样的一种函数关系是未知的，或者过于复杂，以致没有任何实际用途。

例如，某个语音信号（见图 1.1.1）不能通过诸如式（1.1.1）这样的表达式进行函数化描述。一般来说，一段语音可被非常准确地表示为具有不同振幅（幅度）与频率的几个正弦函数之和，即

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

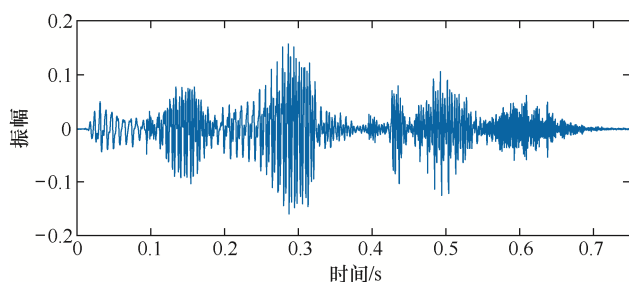


图 1.1.1 语音信号举例

式中, $\{A_i(t)\}$, $\{F_i(t)\}$ 和 $\{\theta_i(t)\}$ 分别是正弦函数的(可能时变的)振幅集、频率集与相位集。实际上, 要解释该语音信号的任何一个短时分段承载的信息内容或消息, 一种方法是测量该信号短时分段中包含的振幅、频率与相位。

自然信号的另一个例子是心电图 (Electrocardiogram, ECG)。这类信号将患者心脏条件的信息提供给医生。类似地,

脑电图 (Electroencephalogram, EEG) 信号提供了脑行为的信息。

语音、心电图与脑电图信号是一些作为单个自变量(这里是时间)的函数的承载信息的信号例子。用两个自变量的函数来描述信号的例子是图像信号。在这种情况下, 自变量是空间坐标。这些只是在实际中遇到的无数自然信号的几个例子。

与自然信号相关的是产生这些信号的方式。例如, 语音信号通过压迫气流穿过声带而产生。图像是感光胶片对某个场景或某个物体曝光得到的。这样, 信号生成通常就与对某种激励或力的响应的系统相联系。在语音信号中, 由声带与声道构成的系统也称声腔。与该系统相联系的激励称为信源。因此, 我们有语音源、图像源及其他类型的信源。

系统也可定义为对某个信号进行某种运算的物理设备。例如, 用于降低承载信息的信号的噪声与干扰的滤波器称为系统。在这种情况下, 滤波器对信号进行一些运算, 达到从承载信息的信号中降低(滤除)噪声与干扰的效果。

让一个信号经过一个系统(如滤波)后, 我们就说处理了该信号。在这种情况下, 对信号的处理包括从所需信号中滤除噪声与干扰。系统通常由其对信号进行的运算来表征。例如, 如果对信号的运算是线性的, 系统就是线性的; 如果对信号的运算是非线性的, 系统就是非线性的; 以此类推。这类运算通常称为信号处理。

将系统的定义推广到不仅包括物理设备, 而且包括对信号进行运算的软件实现, 无疑会带来方便。当我们在—台数字计算机上对信号进行数字处理时, 对信号进行的运算是由一个软件程序指定的数学运算组成的。在这种情况下, 程序就代表系统在软件上的实现。因此, 就有了一个在数字计算机上通过一系列数学运算来实现的某个系统, 也就是说, 我们有了用软件实现的一个数字信号处理系统。例如, 一台数字计算机可以通过编程来进行数字滤波。对信号的数字处理也可通过配置数字硬件(逻辑电路)以进行期望的特定运算来实现。在这样一个实现中, 我们用一台物理设备来执行特定的运算。从更广泛的意义上讲, 一个数字系统可以用数字硬件与软件的组合来实现, 其中的每部分都执行自己的规定运算集。

本书介绍如何通过数字方法(包括软件或硬件)进行信号处理。因为实际工作中遇到的很多信号是模拟信号, 所以还介绍将模拟信号转换成数字信号以便于处理的问题。因此, 我们将主要讨论数字系统。由这样一个系统进行的运算通常可在数学上规定。通过进行相应数学运算的程序来实现系统的方法或规则集称为算法。通常, 以软件或硬件形式实现一个系统以完成所需运算与计算的方法或算法有很多。实际上, 我们感兴趣的是设计能够有效计算、快速且容易实现的算法。因此, 我们学习数字信号处理的一个重要主题是, 讨论一些用于实现诸如滤波、相关和谱分析等运算的高效算法。

1.1.1 数字信号处理系统的基本组成

我们在科学与工程上遇到的大多数信号本质上是模拟信号。也就是说，信号是连续变量（如时间或空间）的函数，其取值范围是连续的。这类信号可被合适的模拟系统（如滤波器、频谱分析仪或倍频器）直接处理，以改变信号的特征或提取某些需要的信息。在这种情况下，我们说信号是以模拟形式直接处理的，如图 1.1.2 所示。输入信号与输出信号均以模拟形式存在。

如图 1.1.3 所示，数字信号处理提供了处理模拟信号的另一种方法。要进行数字化处理，在模拟输入信号与数字信号处理器之间就需要一个接口，这个接口称为**模数（A/D）转换器**。模数转换器的输出是数字信号，该信号适合作为数字信号处理器的输入。

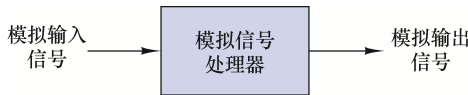


图 1.1.2 模拟信号处理

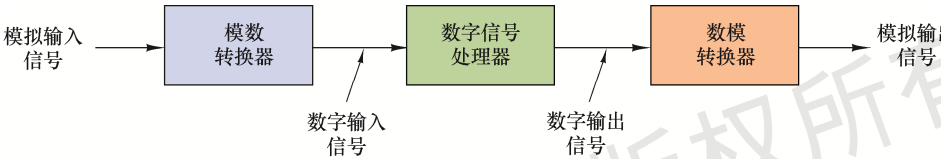


图 1.1.3 数字信号处理系统的框图

数字信号处理器可以通过编程来对输入信号进行期望运算的大型可编程数字计算机，可以是小型微处理器，也可以是通过配置来对输入信号执行规定运算集的硬连线数字处理器。一方面，可编程数字计算机能够通过修改软件来灵活地改变信号处理运算，而硬连线数字处理器则难以重新配置。因此，人们普遍使用可编程的信号处理器。另一方面，定义信号处理运算后，可以优化运算的硬连线实现，得到更廉价的信号处理器，且运算速率通常要快于可编程数字计算机。在像语音通信这类数字信号处理器的数字输出以模拟形式传输给用户的应用中，必须提供另一个从数字域到模拟域的接口，这类接口称为**数模（D/A）转换器**。因此，信号是以模拟形式提供给用户的，如图 1.1.3 中的框图所示。然而，还有另一些包含信号分析的实际应用，在这类应用中，所需信息是以数字形式传输的，不需要数模转换器。例如，在雷达信号的数字处理中，从雷达信号中提取的信息（如飞机的方位与速度）可以简单地计算机终端上显示，在这种情况下不需要数模转换器。

1.1.2 数字信号处理相对于模拟信号处理的优势

如前面简单提及的那样，很多理由使人们更愿意对模拟信号进行数字信号处理，而不在模拟域直接对模拟信号进行处理。首先，数字可编程系统仅通过修改程序就可以灵活地重新配置数字信号处理运算，而重新配置模拟系统通常意味着重新设计硬件，重新进行测试和校验，以观察其是否能正确工作。

精度因素在确定信号处理器的形式方面同样起重要作用。模拟电路元件的容差使得系统设计者很难控制模拟信号处理系统的精度，而数字系统可以很好地控制精度。这些需求又导致在模数转换器和数字信号处理器中根据字长、浮点与定点算术运算等因素来指定精度要求。

数字信号很容易无损地存储在磁性介质（如磁盘或磁带）中，而不会出现模数转换过程中引入的信号保真度退化或损失问题。因此，信号是可以传输的，且可在远程实验室中离线处理。数字信号处理方法同时还使得更复杂信号处理算法的实现成为可能。通常很难对模拟形式的信号进行精确的数学运算，但是这些相同的运算可以在数字计算机上使用软件以常规的方式实现。

在某些情况下，信号处理系统的数字实现要比对应的模拟实现便宜。较低的成本可能是因为数字硬件更便宜，也可能是因为数字实现能够灵活地进行修改。

这些优点使得数字信号处理已在广泛学科领域的实际系统中应用。例如，数字信号处理技术已在如下领域应用：电话信道上的语音处理和信号传输，图像处理与传输，地震学与地球物理学，石油开采，核爆检测，外太空信号处理等，后续章节将介绍其中的一些应用。

然而，如指出的那样，数字实现也有其局限性。局限性之一是模数转换器与数字信号处理器的运算速度。我们将会看到，带宽极宽的信号需要快采样率模数转换器与快速数字信号处理器。因此，对于一些大带宽模拟信号，数字处理方法已经超出了数字硬件的技术发展水平。

1.2 信号的分类

当处理信号或分析系统对信号的响应时，所用的方法严重依赖于特定信号的特征属性。有些技术只适用于特定类别的信号。因此，关于信号处理的任何研究都应该始于特定应用中的信号分类。

1.2.1 多通道信号与多维信号

如 1.1 节解释的那样，信号是由具有一个或多个自变量的函数描述的。函数值（即因变量）可以是实标量、复量或矢量。例如，信号 $s_1(t) = A \sin 3\pi t$ 是一个实信号，而信号 $s_2(t) = A e^{j3\pi t} = A \cos 3\pi t + j A \sin 3\pi t$ 是一个复信号。

在一些应用中，信号由多个信源或多个传感器产生。这样的信号也可用矢量表示。图 1.2.1 显示了由地震产生的地面加速度矢量信号的三个分量。这个加速度由三类基本弹性波导致。第一类基本弹性波是主波（P），也称纵波，它在岩体内纵向传播；第二类基本弹性波是次波（S），也称横波，在岩体内横向传播；第三类基本弹性波靠近地表传播，因此称为面波。如果时间函数 $s_k(t)$, $k = 1, 2, 3$ 表示来自第 k 个传感器的电信号， $p = 3$ 的信号集就可由矢量 $\mathbf{S}_3(t)$ 表示为

$$\mathbf{S}_3(t) = \begin{bmatrix} s_1(t) \\ s_2(t) \\ s_3(t) \end{bmatrix}$$

我们称这样的信号矢量为多通道信号。例如，实际中常用 3 导联与 12 导联心电图，它们分别产生 3 通道与 12 通道信号。

下面我们将注意力转到自变量。如果信号是单个自变量的函数，就称该信号为一维信号；如果信号是 M 个自变量的函数，就称该信号为 M 维信号。

图 1.2.2 所示的图片是二维信号的一个例子，因为每个点的强度或亮度 $I(x, y)$ 是两个自变量的函数。另一方面，亮度是时间的函数，黑白电视画面可以表示为 $I(x, y, t)$ ，因此电视画面可视为三维信号。相比之下，彩色电视画面可以由三个强度函数 $I_r(x, y, t)$, $I_g(x, y, t)$ 和 $I_b(x, y, t)$ 来描述，这三个强度函数是三原色（红色、绿色、蓝色）的时间函数。因此，彩色电视画面是一个可由如下矢量表示的三通道三维信号：

$$\mathbf{I}(x, y, t) = \begin{bmatrix} I_r(x, y, t) \\ I_g(x, y, t) \\ I_b(x, y, t) \end{bmatrix}$$

本书主要介绍单通道一维实信号或复信号（简称信号）。在数学表达式中，这些信号被描述为单

个自变量的函数。虽然自变量不一定是时间，但在实际中常用 t 作为自变量。在许多情况下，本书中推导得到的用于一维单通道信号的信号处理运算与算法，均可推广到多通道与多维信号。

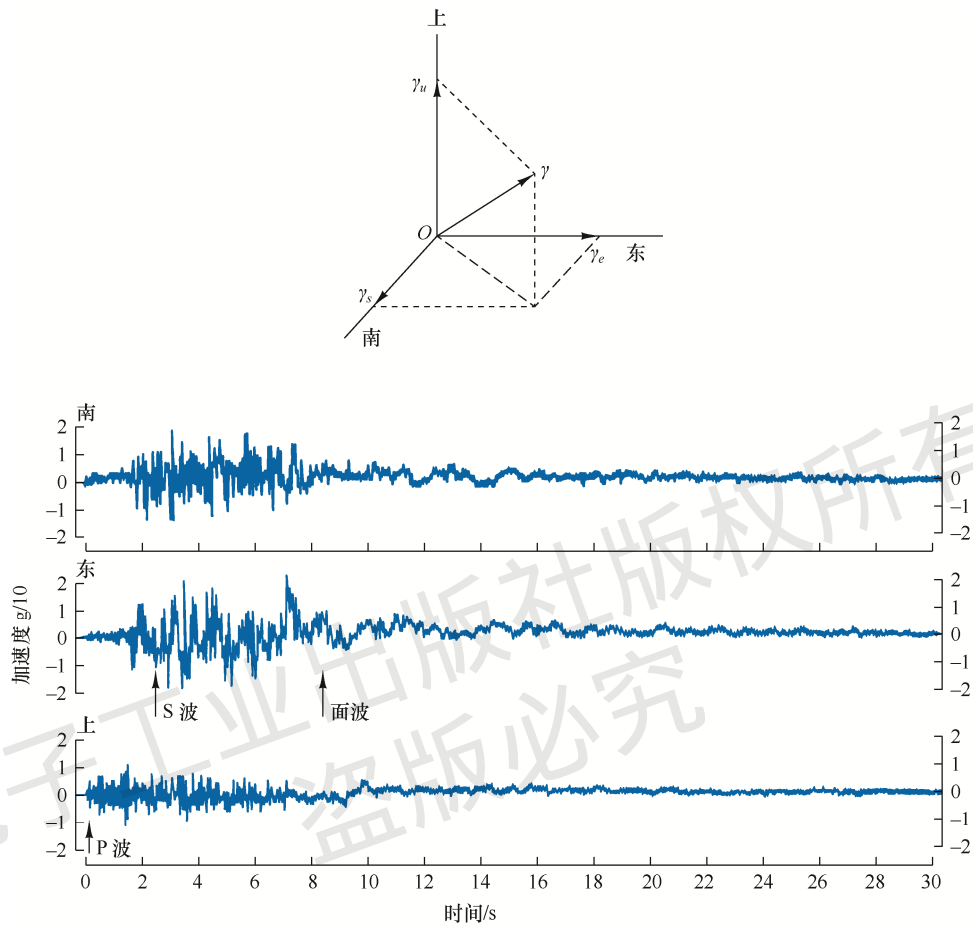


图 1.2.1 在离震中几千米的地点测量的地面加速度的三个分量（摘自 *Earthquakes*, by B. A. Bold, ©1988 by W. H. Freeman and Company, 经出版商许可转载）

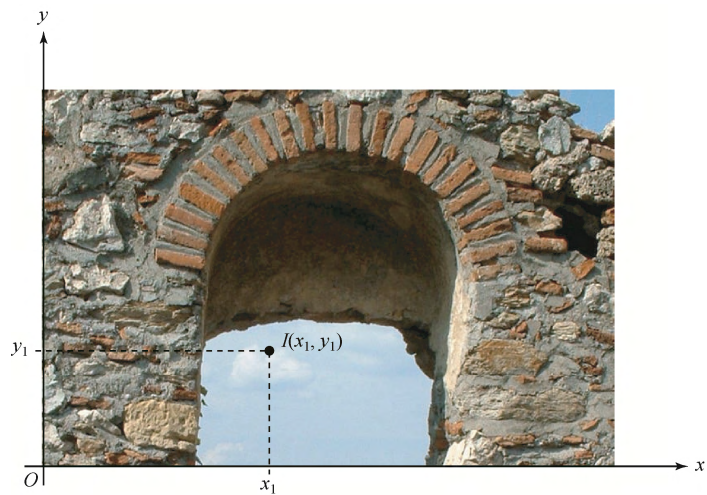


图 1.2.2 二维信号举例

1.2.2 连续时间信号与离散时间信号

根据时间（自）变量的特征和取值，信号可进一步分为四类。**连续时间信号**或**模拟信号**是定义在每个时间值上且在连续区间 (a,b) 上取值的信号，其中 a 可以是 $-\infty$ ， b 可以是 ∞ 。数学上，这些信号可描述为一个连续变量的函数。图 1.1.1 中的语音波形 $x_1(t) = \cos\pi t$ 和信号 $x_2(t) = e^{-|t|}$ ， $-\infty < t < \infty$ 都是模拟信号的例子。**离散时间信号**只在某些特定的时间值上定义。这些时间值不需要是等距的，但在实际中为了计算方便和易于数学处理，常常等间隔取值。信号 $x(t_n) = e^{-|t_n|}$ ， $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 是离散时间信号的一个例子。如果以离散时间的序号 n 为自变量，信号值就变成一个整数变量（即一个数字序列）的函数。这样，一个离散时间信号在数学上就可表示为一个实数字序列或复数字序列。为了强调信号的离散时间特性，我们用 $x(n)$ 而非 $x(t)$ 表示这种信号。如果时刻 t_n 是等间隔的（即 $t_n = nT$ ），也可使用记号 $x(nT)$ 。例如，序列

$$x(n) = \begin{cases} 0.8^n, & n \geq 0 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1.2.1)$$

是一个离散时间信号，它的图形表示如图 1.2.3 所示。

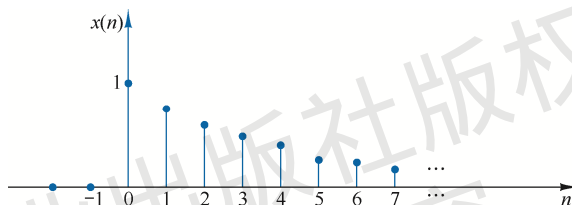


图 1.2.3 离散时间信号 $x(n) = 0.8^n, n \geq 0$ 和 $x(n) = 0, n < 0$ 的图形表示

在应用中，离散时间信号可能以如下两种方式出现。

1. 在离散时刻处选择模拟信号的一个值。这个过程称为**采样**，详见第 6 章中的讨论。在规则的时间间隔处进行测量的所有仪器都能提供离散时间信号。例如，图 1.2.3 中的信号 $x(n)$ 可以通过对模拟信号 $x(t) = 0.8^n, t \geq 0$ 和 $x(t) = 0, t < 0$ 每秒采样一次获得。
2. 在一段时间内累积某个变量。例如，统计每小时通过某条街道的汽车数量，或者记录每天的黄金价格，得到一个离散时间信号。图 1.2.4 显示了沃尔夫（Wölfer）太阳黑子数量的图形，这个离散时间信号的每个样本都提供了在一年内观测到的太阳黑子数。

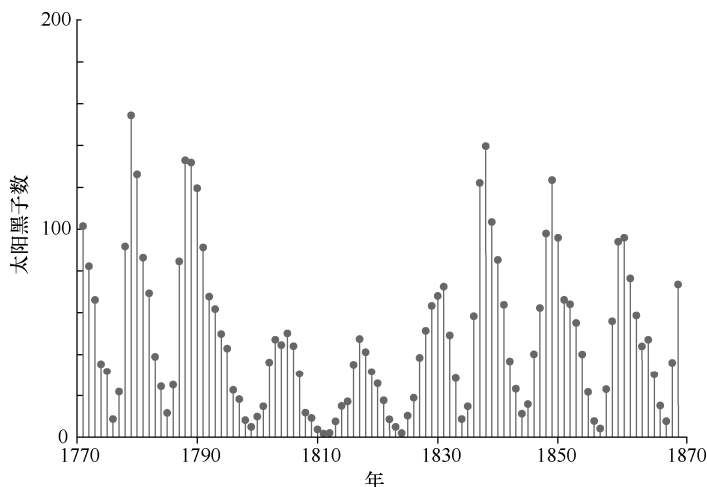


图 1.2.4 沃尔夫年太阳黑子数（1770—1869）

1.2.3 连续值信号与离散值信号

连续时间信号或离散时间信号的值可以是连续的，也可以是离散的。如果一个信号在一个有限或无限范围内取所有可能的值，就称其为**连续值信号**。另外，如果信号只从一个可能取值的有限集上取值，就称其为**离散值信号**。一般来说，这些信号是等距的，因此可以表示为两个连续值之间的距离的整数倍。具有离散值的离散时间信号称为**数字信号**。图 1.2.5 显示了取 4 个可能值之一的数字信号。

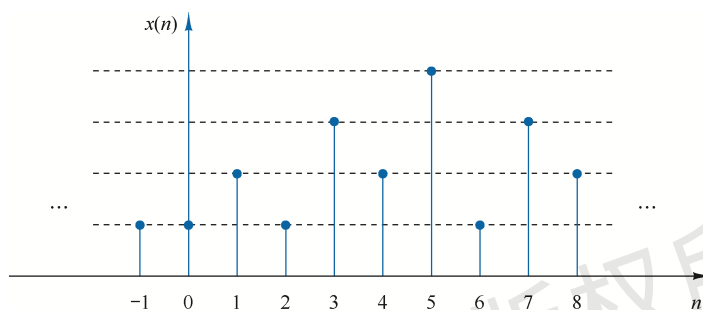


图 1.2.5 取 4 个可能值之一的数字信号

要对一个信号进行数字化处理，该信号在时间上就必须是离散的，并且取值也是离散的（即它必须是数字信号）。如果待处理信号是以模拟形式存在的（见第 6 章），首先就要在离散时刻对模拟信号采样，得到离散时间信号，然后将值量化到某个离散值集上。将连续值信号转换为离散值信号的过程称为**量化**，量化基本上是逼近处理。量化可通过舍入和截尾简单地完成。例如，如果数字信号中允许的信号值是从 0 到 15 的整数，连续信号值就被量化到这些值上。因此，如果量化过程是通过截尾进行的，信号值 8.58 就近似为 8，而如果量化过程是通过舍入到最接近的整数进行的，信号值 8.58 就近似为 9。

1.2.4 确定性信号与随机信号

信号的数学分析与处理需要信号本身存在可用的数学描述。这种常被称为**信号模型**的数学描述引出了信号的另一种重要分类。可被显式数学方程、数据表或者定义好的规则唯一描述的任何信号，称为**确定性信号**。确定性信号用来强调这样一个事实，即信号过去、现在和将来的所有取值都可以准确地知道，不存在任何不确定性。

然而，在很多实际应用中，有些信号不能被显式数学方程表达到任意合理的精度，抑或这样的描述太过复杂而不实用。缺乏这样一种关系表明这类信号在时间上是以不可预测的方式演变的。我们称这类信号为**随机信号**。噪声发生器的输出、图 1.2.1 中的地震信号和图 1.1.1 中的语音信号都是随机信号的例子。

概率论与随机过程为随机信号的理论分析提供了数学框架。13.1 节将给出按本书所需修改的这种方法的一些基本元素。

要强调的是，我们不总能清晰地将**真实世界**的信号分类为确定性信号或随机信号。有时，两种方法均能得到对信号表示进行深度研究的有用结果；有时，错误的分类可能导致错误的结果，因为有些数学工具只适用于确定性信号或者随机信号。当我们介绍特定的数学工具时，这一点会变得更清晰。

1.3 小结

本章介绍了用数字信号处理方法取代模拟信号处理方法的动机，给出了数字信号处理系统的基本元素，定义了将模拟信号转换为便于处理的数字信号所需要的运算。

数字信号处理的实际应用非常广泛。Oppenheim (1978)一书介绍了数字信号处理在语音处理、图像处理、雷达信号处理、声呐信号处理和地球物理信号处理中的应用。

习 题

1.1 按照是一维信号还是多维信号、是单通道信号还是多通道信号、是连续时间信号还是离散时间信号、（在振幅上）是模拟信号还是数字信号，对如下信号进行分类，并给出简单的说明。

- (a) 纽约证券交易所公用事业股票的收市价格。
- (b) 一部彩色电影。
- (c) 运动中的汽车方向盘相对于汽车参考帧的位置。
- (d) 运动中的汽车方向盘相对于地面参考帧的位置。
- (e) 一个小孩每月的体重与身高的测量结果。