



经典译丛

PEARSON

信息与通信技术

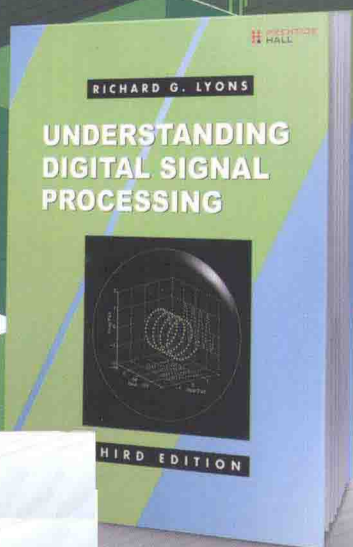


Understanding Digital Signal Processing
Third Edition

数字信号处理 (第三版)

Understanding Digital Signal Processing
Third Edition

【美】 Richard G. Lyons 著
张建华 许晓东 孙松林 等译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

经典译丛·信息与通信技术

数字信号处理 (第三版)

Understanding Digital Signal Processing
Third Edition

[美] Richard G. Lyons 著

张建华 许晓东 孙松林 等译

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书全面讨论了数字信号处理的基本概念、原理和应用。全书共 13 章, 主要包括离散序列和系统、离散傅里叶变换及其快速算法、有限和无限脉冲响应滤波器设计基本原理等基本的数字信号处理内容, 另外包括数字网络和滤波器、离散希尔伯特变换、抽样率的变换和信号平均、信号数字化及其影响等专业信号处理内容。书中给出了作者多年总结的一些数字信号处理的技巧, 包括如何进行复数的快速乘法、实序列的快速傅里叶变换、使用快速傅里叶变换的有限脉冲响应滤波器设计等。附录对数字信号处理涉及的数学知识和术语给出了详细介绍和总结。相比于前版, 本书每章都新增了部分内容, 并附加习题, 便于读者自学。

本书可作为高等院校电子、计算机、通信等专业的本科或研究生教材, 对于数字信号处理领域的工程技术人员也有很好的参考价值。

Authorized translation from the English language edition, entitled Understanding Digital Signal Processing, Third Edition, 9780137027415 by Richard G. Lyons, published by Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall, Copyright © 2011 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: 01-2011-3683

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理: 第3版/(美)莱昂斯(Lyons, R. G.)著; 张建华等译. —北京: 电子工业出版社, 2015.5
(经典译丛·信息与通信技术)

书名原文: Understanding Digital Signal Processing, Third Edition

ISBN 978-7-121-24367-7

I. ①数… II. ①莱… ②张… 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 215606 号

策划编辑: 马 岚

责任编辑: 杨 博

印 刷: 三河市华成印务有限公司

装 订: 三河市华成印务有限公司

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: 38.75 字数: 1068 千字

版 次: 2015 年 5 月第 1 版(原著第 3 版)

印 次: 2015 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 99.00 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 zllts@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(Digital Signal Processing)是指将信号以数字方式表示并进行处理的理论和技术。广义来说,数字信号处理是研究用数字方法对信号进行分析、变换、滤波、检测、估计、识别、调制、解调以及快速算法等的一门技术学科。

本书第一版和第二版,即 *Understanding Digital Signal Processing*, 由于作者 Richard G. Lyons 在数字信号处理领域的长期工作经验和教学经历,受到了很多数字信号处理初学者和使用者的高度评价,认为其将“理论与实践完美地结合起来”。我们在 2010 年 7 月对本书第二版进行了改编,用于本科生的英语和双语教学,在使用过程中,受到了在校学生和广大工程技术人员的普遍欢迎。第三版继承了其一贯的风格,通过具有启发性的解释和精心挑选的例子,采用读者可以理解的数学表示方法,对数字信号处理技术进行了解释,帮助读者从整体上理解数字信号处理,并逐步掌握较高层次的数字信号处理概念和应用。第三版对每章内容都进行了扩充,更重要的是每章都增加了习题,帮助学生更好地理解和掌握相关内容。尤其值得推荐的是第 13 章,作者增加了大量数字信号处理的新技巧,这些技巧精彩又实用。

随着数字电路与系统技术以及计算机技术的发展,数字信号处理技术也相应地得以飞速发展,其应用领域十分广泛,包括计算机、通信、图像处理、医疗和语音等。数字信号处理课程也成为很多院校的基础专业课程。由于本书舍弃了生硬的公式和推导,通过形象的语言,让读者通过具体的实例来学习和理解复杂的概念和变换,因此我们也分外珍惜这次翻译第三版的契机。本着为读者呈现精品的宗旨,结合多年来采用本书第二版的教学经验,竭力使译文更好地贴近原文,希望本书也能成为工程师们的重要参考工具书之一。

本书的翻译由北京邮电大学信息和通信工程学院的张建华、许晓东和孙松林老师负责,部分博士生、硕士生参与,并由张建华统稿、审校和定稿。参与翻译的人员有:包伟、姜蕴、何晓丹、张慧鑫、吴宝学、李皇玉、张丹婷和陈娜等。

本书的出版得到国家自然科学基金(No. 61171105、No. 61322110)、教育部博士点基金(201300051100013)以及北京邮电大学教学改革课程立项的资助。同时,恳切希望读者在学习及使用中予以检视和指正!

本书可作为高等院校电子、计算机、通信等专业的本科生或研究生教材,对于数字信号处理领域的工程技术人员和专业技术人员也有很好的参考价值。

张建华 于北京邮电大学

前 言

本书是之前出版的 *Understanding Digital Signal Processing, Second Edition* 的更新版。和前一版一样,本书的目的有两点:

- (1)帮助初学者理解数字信号处理的理论内容;
- (2)提供同类书中很少涉及的关于数字信号处理实际应用的案例,帮助工程师和研究人员更好地设计、检验自己的数字信号处理系统。

相比前一版,这一版的每一章都添加了一些新内容。

首先按惯例在序言中指出为什么需要学习数字信号处理。并不需要讲在现在这个社会学好数字信号处理是一件多么重要的事,读者应该已经有所了解。在这里我只想谈电子信息的未来就是数字信号处理,学好这本书就不会落伍。

致教师

本书非常适合本科生进行1~2个学期的学习。此版在撰写过程中参考了我之前在加州大学圣克鲁兹分校从教期间所积累的素材,为了帮助学生更好地学习数字信号处理,本书提供了更多的原理解释和生动示例来增加它的教学价值;同时,每一章的最后都提供了一些经典习题来帮助学生检验学习成果(习题答案可以从 Pearson 出版社获取^①)。

致工程人员

为了帮助相关人员实现数字信号处理工程应用,第三版的改动如下(但并不仅仅局限于以下几点):

- 对建立离散微分器、积分器、匹配滤波器提供具有实践意义的指导;
- 对信号统计度量,通过平均来降低信号变化幅度以及计算现实环境中的信噪比(Signal-to-Noise Ratios, SNR)等技术进行综述;
- 对采样率转换(多采样率系统)和相关滤波器的设计这一章做了大量的补充;
- 卷积的快速实现[与频域的有限脉冲响应(FIR)滤波器相关];
- 无限脉冲响应(IIR)滤波器的缩放;
- 提供了更多的最新技术材料,方便于研究数字滤波器的特性和性能;
- 扩展了现代信号处理系统中常用的二进制数字格式标准等相关内容;
- 在第13章“数字信号处理技巧”增加了适量的内容。

致学生

学习掌握数字信号处理的理论基础,能够以数字信号处理的专业语言描述问题,这些都不需要高深的理论技巧和深厚的数学知识,需要的仅是一些基本的代数知识,外加知道什么是正弦波

^① 教辅申请方式参见书末的“教学支持说明”。

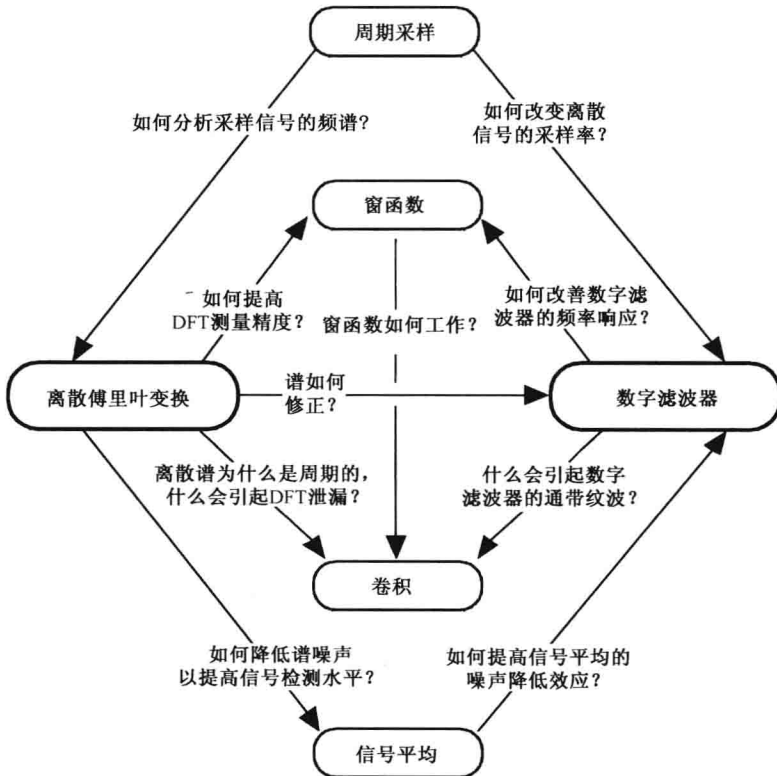
形以及学习本书的热情。听起来也许很难相信，尤其是当你已经大致翻过本书，看到了大量的公式和图表之后，你也许会认为本书和那些曾经吓退过你的技术期刊类似，但是，本书并不同于它们。

本书一直坚持以一种舒缓且详尽的方式阐述数字信号处理的理论和实践，但是本书的宗旨绝不是让读者大概明白即可，而是能够完全掌握相关内容。我一直尝试避免传统的老师和学生的授教关系，而是寻找一种类似于朋友之间公园散步聊天形式的探讨，本书用了大量的数学理论和实例来帮助读者理解数字信号处理。

关于本书的习题我也进行了有针对性的设计，不再是之前大量的代数公式求解；相反，这些习题都非常具有启迪意义，能够帮助读者在未来的日子里更好地理解数字信号处理相关内容。换句话说，本书的习题不是那种“机械代数”式的重复劳动，而是能够启发读者更好地理解数字信号处理。解决了这些问题能够使读者对数字信号处理更加感兴趣而不再是传统的消极接受。

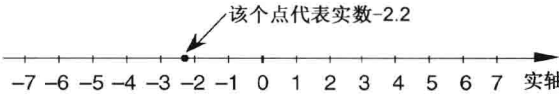
学习历程

学习数字信号处理不应该是一种必须背负的任务，它更应该像是一个旅行。当理解了数字信号处理某一方面的内容，你可能又会在另一个方面产生疑惑，这就驱使你不断前行。当你已经拥有了足够的知识，就会开始探索数字信号处理更深层次的内容，就像下面的框图所示。对读者而言，本书就是学习旅程中的导游手册。



在学习过程中，并不是必须有一台计算机，但是拥有一台计算机一定能帮你更快更好地学习数字信号处理。数字信号处理的模拟软件能够让初学者通过长时间的测试以及纠正其中的错误来验证书本上的内容。不仅如此，用计算机软件还可以画出信号，实现快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transforms, FFT)，这些在分析数字滤波器的过程中都十分有益。

如果你感觉到自己在学习本书的过程中进度很慢，也不必沮丧。正如希腊数学家梅内克缪斯 (Menaechmus) 曾经告诉亚历山大关于数学学习的那句话：在通往数学的道路上没有坦途，仅有的一条路就是认真地学习。在数字信号处理的学习中亦然。当然，如果你在某些章节因不能理解而需要重复阅读的时候，也不必着急，因为本书的内容并不像量子物理学那样复杂，也不像歌曲“Louie Louie”的歌词那样神秘，更不像一条条冰冷的汇编指令那样令人费解，但是深刻的道理绝对值得仔细推敲研究。所以慢慢看，认真地理解是十分重要的。如果你认真地做了，那么绝对是值得的，坚持你的理想，就像安东尼·苏珊所说的：勤奋认真的人绝不会失败。



章节介绍

第 1 章首先介绍在本书中会经常用到的数学符号的意义，内容包括离散信号序列的基本概念，以及它们与连续信号之间的关系，并举例阐明如何在时域和频域表述这些离散信号。另外，第 1 章还定义了建立信号处理系统框图中经常用到的操作符号，以及简单介绍了线性系统的意义以及为什么用线性运算能够使我们的研究更加便利。

第 2 章介绍数字信号处理中最容易被误解的概念：周期性采样。虽然采样的概念并不复杂，但是这里面有一些数学方面的小细节非常值得推敲。首先从基带信号采样开始，逐步引出我们最感兴趣的带通信号采样。最后，解释了如何从频域的角度来理解采样的概念。

第 3 章的主要内容是数字信号处理领域中最重要概念，即用于频谱分析的离散傅里叶变换 (DFT)。该章首先通过具体实例来阐释离散傅里叶变换所具有的重要性质以及如何理解离散傅里叶变换的频域性质，然后讨论用于降低离散傅里叶变换频谱泄漏的常用窗函数，以及用离散傅里叶变换运算所能带来的处理增益。另外该章也包含了对常用窗函数的细节讨论，相信读者在以后会经常遇到这方面的内容。

第 4 章的主要内容是在数字信号处理领域产生深刻影响的创新性技术：快速傅里叶变换 (FFT)。该章会介绍基 2 快速傅里叶变换和离散傅里叶变换两者之间的关系，从量的角度来直观理解快速傅里叶变换所带来的巨大优势，而这也正是快速傅里叶变换能得到广泛应用的最大原因。第 4 章还列举了一些材料，帮助读者在实际中使用快速傅里叶变换。

第 5 章进入数字滤波器设计的领域。首先从一个简单的低通有限脉冲响应滤波器 (FIR) 开始，仔细分析它的幅频特性和相频特性。其次，讲述窗函数是如何影响 FIR 滤波器设计的。然后介绍如何将数字低通 FIR 滤波器转换为带通滤波器和高通滤波器，著名的 Parks-McClellan (Remez) 方法将在这里进行介绍。该章还会为读者解释关于卷积的内容，通过几个简单的卷积的例子，以卷积理论来对第 5 章进行总结并向读者展示为什么卷积在数字信号处理中是一个非常重要的概念。

第 6 章介绍第二类数字滤波器：无限脉冲响应 (IIR) 滤波器。在讨论了几个设计 IIR 滤波器

的方法之后，会介绍一种非常有用的数字信号处理分析工具： z 变换。由于 z 变换和时域的拉普拉斯变换形式很相近，因此我们会从拉普拉斯变换最基础的部分讲起，然后再转向介绍 z 变换。我们将会看到 IIR 滤波器是如何设计并实现的，以及它与 FIR 滤波器究竟有何不同。为了使读者明白在什么条件下应该选择哪一种滤波器，在第 6 章的最后我们对 FIR 滤波器和 IIR 滤波器的关键特性进行了量化对比。

第 7 章介绍一些特殊的数字信号处理功能器：微分器、积分器和匹配滤波器。另外，该章还会介绍两种并未在其他书籍中涉及到的同类滤波器：内插滤波器和频率采样滤波器，它们的出现能够改善低通滤波的计算效率。要更好地理解这些滤波器需要第 6 章介绍的 z 变换相关知识，因此虽然它们都属于 FIR 滤波器，但却在第 7 章才给予介绍。

第 8 章详细阐述正交信号，它们又被称为复信号。复信号理论在信号分析和数字通信领域越来越受到重视，因此它占据了一章的内容。通过三维图示，本章对复信号的数学注解、运算优势和实际应用进行了固体物理意义上的解释，其中特别强调了复信号采样的相关内容。

第 9 章主要介绍希尔伯特变换，利用它可以将一个实信号变为复信号。第 7 章的主要内容包括希尔伯特变换的性质，以及如何设计希尔伯特变换器。

第 10 章介绍非常实用的多率采样(通过抽取与内插来实现)。采样率转换是一个能够提高系统性能并降低计算复杂度的信号处理技术，同时也是低通滤波器的一个具体应用场景。另外，多相位和串行积分器梳状滤波器也会在第 10 章有所介绍。

第 11 章介绍信号平均化的相关内容，包括如何通过信号平均来降低背景噪声从而提高信号测量的准确度，通过这种平均化实现的准确度提升称为处理增益。第 11 章也会展示如何通过时在域、频域对信号进行平均从而预测处理增益。除此之外，相关平均和非相关平均的主要不同之处也会在该章通过例子来阐述与解释。最后，还会对现在比较流行的指数平均技术进行详细的介绍。

第 12 章介绍现代数字信号处理领域读者经常遇到的不同的二进制数字格式。该章建立了这种数字格式的精确度和动态范围，并阐述它内在的固有缺陷。对二进制数字的探索很自然地引出了模数转换器(A/D converter)精度的讨论以及根据具体情况如何设计最优的模数转换器。之后将介绍目前最流行的补救溢出问题的措施：截断和舍入。这两种方法可以有效地解决数字溢出以及舍入误差的问题。第 12 章最后介绍浮点型二进制数字格式。相比定点型格式，浮点型使用起来限制条件少，更加便利，特别是能够减少数字溢出带来的错误问题。

第 13 章汇总现代数字信号处理专业技术层面上最实用的一些小技巧，它们能够使数字信号处理更加高效。把这些内容编入最后一章主要是出于两个方面的考虑。首先，将这些小技巧放到一起是明智的选择，这样读者就知道在哪里能够最快地找到它们；其次，理解运用这些技巧需要前面的知识做铺垫。另外，研究这些新技术的同时也能温习之前章节的知识，起到复习的作用。

附录安排了一些能帮助初学者理解数字信号处理本质的相关内容。复数运算法则在附录 A 中介绍；附录 B 推导了最常用却很少解释的几何级数的闭式表达式。一些琐碎内容和离散系统时间反转的两种表达式在附录 C 中提及；统计意义上的平均、方差和标准差在附录 D 中介绍；附录 E 介绍对数-分贝坐标系的含义以及在幅频特性中的使用情况；附录 F 介绍数字滤波器中的常用术语；附录 G 和 H 提供设计分析特殊滤波器的补充内容；附录 I 解释切比雪夫窗序列的计算问题。

致 谢

新版中添加的内容绝大多数都是我在“USENET newsgroup comp. dsp”组织中学到的，我十分感谢曾为我提供过帮助的同事们，鉴于篇幅就不一一列出了。

另外，在这里我还要感谢在本书前一版中承担过审阅工作的同事们，感谢 Randy Yates, Clay Turner 和 Ryan Groulx 对本书的改进做出的重大贡献，尤其要感谢的是我的好友兼数学家 Antoine Trux，正是因为他夜以继日地工作才有本书习题指导的诞生。

之前已经提到，我还要感谢本书的编辑 Bernard Goodwin, Elizabeth Ryan，正是因为有他们的协助才有了本书的面世，当然还有 Prentice Hall 出版社的功劳。

如果你坚持看到了这里，我十分感谢你的支持也衷心希望你能够从本书中获益。如果对本书内容有什么建议和意见，或是发现了哪怕是极小的错误，都希望你能够联系我 (E-mail: R. Lyons@ieee.org)，我将尽快回复你的电子邮件。

目 录

第 1 章 离散序列与离散系统	1
1.1 离散序列及其表示法	1
1.2 信号振幅、幅度和功率	5
1.3 信号处理的运算符	6
1.4 离散线性时不变系统概述	7
1.5 离散线性系统	8
1.5.1 线性系统的例子	8
1.5.2 非线性系统的例子	8
1.6 时不变系统	11
1.6.1 时不变系统的例子	11
1.7 LTI 系统的可交换性	12
1.8 分析 LTI 系统	12
参考文献	14
习题	14
第 2 章 周期采样	19
2.1 混叠: 信号的频率模糊性	19
2.2 低通信号采样	22
2.3 带通信号采样	25
2.4 带通采样中的实际问题	27
2.4.1 带通采样中的频谱反转	27
2.4.2 将采样频谱定位在 $f_s/4$ 处	28
2.4.3 带通采样信号的噪声	29
参考文献	30
习题	30
第 3 章 离散傅里叶变换	35
3.1 理解 DFT 等式	36
3.1.1 DFT 例 1	38
3.2 DFT 对称性	44
3.3 DFT 线性	46
3.4 DFT 幅度	46
3.5 DFT 频率轴	47
3.6 DFT 移位定理	47
3.6.1 DFT 例 2	48
3.7 IDFT	49
3.8 DFT 泄漏	50
3.9 窗口	55

3.10	DFT 扇形损失	60
3.11	DFT 分辨率、零样值填充和频域采样	60
3.12	DFT 处理增益	63
3.12.1	单一 DFT 处理增益	63
3.12.2	平均多 DFT 带来的集成增益	65
3.13	矩形函数的 DFT	65
3.13.1	一般矩形函数的 DFT	66
3.13.2	对称矩形函数的 DFT	70
3.13.3	全 1 矩形函数的 DFT	72
3.13.4	与 DFT 相关的时间轴和频率轴	74
3.13.5	全 1 矩形函数 DFT 的另一种形式	75
3.14	使用离散时间傅里叶变换说明 DFT	76
	参考文献	78
	习题	79
第 4 章	快速傅里叶变换	84
4.1	FFT 与 DFT 的关系	84
4.2	FFT 在实际应用中要注意的要点	85
4.2.1	采样时间和采样率	85
4.2.2	在频域变换前对时域信号进行处理	86
4.2.3	FFT 结果的增强	86
4.2.4	FFT 的结果分析	87
4.3	基 2 FFT 算法的起源	88
4.4	FFT 输入输出数据的二进制反转	93
4.5	基 2 FFT 蝶形结构	94
4.6	备用的单一蝶形结构	96
	参考文献	98
	习题	99
	参考文献	104
第 5 章	有限脉冲响应滤波器	105
5.1	FIR 滤波器的介绍	106
5.2	FIR 滤波器中的卷积	108
5.3	FIR 低通滤波器的设计	116
5.3.1	加窗法	116
5.3.2	FIR 滤波器设计中常用到的窗函数	121
5.4	FIR 带通滤波器的设计	127
5.5	FIR 高通滤波器的设计	128
5.6	最优滤波器设计法	129
5.7	FIR 半带滤波器	131
5.8	FIR 滤波器的相频响应	132
5.9	离散卷积	135
5.9.1	时域离散卷积	136

5.9.2	卷积定理	137
5.9.3	卷积定理的应用	140
5.10	FIR 滤波器分析	142
5.10.1	FIR 滤波器的代数学分析	142
5.10.2	FIR 滤波器的 DFT 分析	143
5.10.3	FIR 滤波器群延迟	144
5.10.4	FIR 滤波器通带增益	146
5.10.5	估计 FIR 滤波器的抽头数	146
	参考文献	147
	习题	149
第 6 章	无限脉冲响应滤波器	157
6.1	引言	158
6.2	拉普拉斯变换	159
6.2.1	s 平面上的极点、零点和稳定性	162
6.3	z 变换	167
6.3.1	极点、零点和数字滤波器的稳定性	168
6.4	用 z 变换分析滤波器	169
6.4.1	IIR 滤波器的 z 域分析	170
6.4.2	IIR 滤波器分析实例	172
6.5	利用极点和零点分析 IIR 滤波器	175
6.5.1	IIR 滤波器传递函数的代数形式	175
6.5.2	利用零点/极点得到传递函数	175
6.6	其他形式的 IIR 滤波器结构	178
6.6.1	直接 I 型、直接 II 型和转置结构	178
6.6.2	转置定理	179
6.7	构造 IIR 滤波器的误区	180
6.8	用级联结构改进 IIR 滤波器	182
6.8.1	级联和并联滤波器的性质	182
6.8.2	IIR 级联滤波器	183
6.9	对 IIR 滤波器增益进行限制	185
6.10	IIR 滤波器的脉冲响应不变法	187
6.10.1	应用脉冲响应不变法 1 的实例	191
6.10.2	应用脉冲响应不变法 2 的实例	192
6.11	IIR 滤波器设计的双线性变换法	196
6.11.1	双线性变换法设计实例	200
6.12	最优的 IIR 滤波器设计方法	203
6.13	IIR 和 FIR 滤波器的比较	204
	参考文献	205
	习题	206
第 7 章	常用的数字网络和滤波器	220
7.1	微分器	220

7.1.1	简单的微分器	221
7.1.2	专用窄带微分器	223
7.1.3	宽带微分器	224
7.1.4	最优化的宽带微分器	225
7.2	积分器	226
7.2.1	矩形规则积分器	226
7.2.2	梯形规则积分器	227
7.2.3	Simpson 规则积分器	227
7.2.4	Tick 规则积分器	228
7.2.5	各积分器的性能比较	228
7.3	匹配滤波器	230
7.3.1	匹配滤波器的性能	231
7.3.2	匹配滤波器示例	231
7.3.3	匹配滤波器实现中需考虑的问题	233
7.4	FIR 内插低通滤波器	233
7.4.1	选择最优的扩展因子 M	237
7.4.2	FIR 滤波器抽头个数的估计	237
7.4.3	IFIR 滤波器的性能	237
7.4.4	有关 IFIR 滤波器实现的一些问题	238
7.4.5	IFIR 滤波器设计实例	239
7.5	频率采样滤波器	240
7.5.1	级联中的梳状滤波器和复振荡器	242
7.5.2	多节复 FSF	245
7.5.3	FSF 的稳定性	249
7.5.4	多级实系数 FSF	251
7.5.5	具有线性相位的多级实系数 FSF	253
7.5.6	小结	254
7.5.7	一种有效的实系数 FSF 结构	254
7.5.8	对 FSF 的模拟	256
7.5.9	通过使用过渡带系数改善滤波器的性能	257
7.5.10	另一种 FSF 结构	258
7.5.11	FSF 的优点	259
7.5.12	第 4 种 FSF 结构设计实例	260
7.5.13	何时使用 FSF?	261
7.5.14	FSF 的设计	263
7.5.15	总结	265
	参考文献	265
	习题	267
第 8 章	正交信号	272
8.1	为什么要研究正交信号?	272
8.2	复数的表示	273

8.3	实信号的复向量表示	276
8.4	一些关于负频率的思考	278
8.5	正交信号的频域特征	279
8.6	频域带通正交信号	280
8.7	下变频	282
8.8	一个下变频的实例	283
8.9	一种等效的下变频方法	286
	参考文献	287
	习题	288
第9章	离散希尔伯特变换	295
9.1	希尔伯特变换的定义	295
9.2	为什么关心希尔伯特变换?	296
9.3	希尔伯特变换的脉冲响应	300
9.4	设计离散的希尔伯特变换器	302
9.4.1	时域希尔伯特变换: FIR 滤波器的实现	302
9.4.2	频域希尔伯特变换	305
9.5	时域解析信号的生成	305
9.6	解析信号产生方法的比较	307
	参考文献	307
	习题	308
第10章	采样率转换	312
10.1	抽取	312
10.2	二级抽取	314
10.2.1	二级抽取的概念	314
10.2.2	二级抽取举例	315
10.2.3	二级抽取的条件	316
10.3	下采样的特性	316
10.3.1	下采样的时域和频域特性	316
10.3.2	绘制下采样后的频谱	317
10.4	内插	318
10.5	内插的特性	319
10.5.1	内插的时域特性和频域特性	319
10.5.2	绘制上采样的频谱	320
10.6	抽取和内插的结合	321
10.7	多相滤波器	321
10.8	二级内插	325
10.8.1	二级内插的概念	325
10.8.2	二级内插的例子	327
10.8.3	二级内插的考虑事项	328
10.9	多率系统的 z 变换分析	329
10.9.1	信号的数学表示	329

10.9.2	滤波器的数学表示	330
10.10	多相滤波器的实现	330
10.11	分数因子的采样率转换	334
10.12	半带滤波器的采样率转换	336
10.12.1	半带滤波的基本原理	336
10.12.2	半带滤波器的实现	338
10.13	IFIR 滤波器的采样率转换	339
10.14	级联的积分梳状滤波器	340
10.14.1	递归移动求和滤波器	341
10.14.2	CIC 滤波器结构	342
10.14.3	改善 CIC 滤波器的衰减	346
10.14.4	CIC 滤波器的实现问题	347
10.14.5	FIR 补偿/预处理滤波器	350
	参考文献	351
	习题	352
第 11 章	信号平均	366
11.1	相干平均	367
11.2	不相干平均	371
11.3	多个 FFT 的平均	373
11.4	平均相位角	375
11.5	时域平均滤波的问题	376
11.6	指数平均	378
11.6.1	时域滤波	379
11.6.2	频域滤波性能	381
11.6.3	指数平均器的应用	382
	参考文献	383
	习题	384
第 12 章	数字数据格式及其影响	387
12.1	定点二进制格式	387
12.1.1	八进制数	388
12.1.2	十六进制数	388
12.1.3	符号-幅度二进制格式	389
12.1.4	2 的补码二进制格式	389
12.1.5	偏移二进制格式	390
12.1.6	二进制小数	390
12.2	二进制数的精度和动态范围	393
12.3	定点二进制有限字长的影响	394
12.3.1	模数转换器的量化误差	394
12.3.2	数据溢出	399
12.3.3	截断	402
12.3.4	舍入	403

12.4	浮点二进制格式	405
12.4.1	浮点数的动态范围	407
12.5	块浮点二进制格式	409
	参考文献	409
	习题	410
第 13 章	数字信号处理技巧	416
13.1	无乘法的频率变换	416
13.1.1	$f_s/2$ 频率变换	416
13.1.2	$-f_s/4$ 频率变换	418
13.1.3	$f_s/4$ 频率下变频后的滤波和抽取	419
13.2	向量幅度的快速估算	422
13.3	频域加窗	424
13.4	复数的快速乘法	426
13.5	实序列 FFT 的高效算法	427
13.5.1	两个 N 点实序列 FFT	427
13.5.2	$2N$ 点实序列 FFT	432
13.6	用 FFT 计算 IFFT	435
13.6.1	第一种 IFFT 算法	435
13.6.2	第二种 IFFT 算法	436
13.7	简化的 FIR 滤波器结构	437
13.8	减小模数转换器的量化噪声	438
13.8.1	过采样	438
13.8.2	抖动	440
13.9	模数转换器测试技术	442
13.9.1	用 FFT 估计模数转换器的量化噪声	442
13.9.2	估算模数转换器的动态范围	445
13.9.3	丢码检测	446
13.10	用 FFT 进行快速 FIR 滤波	447
13.11	正态分布随机数据的产生	451
13.12	零相位滤波	452
13.13	锐化的 FIR 滤波器	453
13.14	带通信号内插	454
13.15	频谱峰值定位算法	456
13.16	FFT 旋转因子的计算	458
13.16.1	频域抽取 FFT 旋转因子	458
13.16.2	时域抽取 FFT 旋转因子	459
13.17	单一音频的检测	460
13.17.1	Goertzel 算法	461
13.17.2	Goertzel 算法举例	462
13.17.3	Goertzel 算法相对 FFT 算法的优点	463
13.18	滑动 DFT	463

13.18.1	滑动 DFT 算法	463
13.18.2	SDFT 的稳定性	466
13.18.3	SDFT 的泄漏抑制	467
13.18.4	鲜为人知的 SDFT 性质	468
13.19	频谱细化的 FFT	469
13.20	一种实用的频谱分析仪	471
13.21	一种有效的反正切估计算法	473
13.22	频率解调算法	474
13.23	消除直流分量	476
13.23.1	块数据直流消除	477
13.23.2	实时系统中的直流消除	477
13.23.3	量化的实时系统直流消除方法	478
13.24	传统的 CIC 滤波器的改进	479
13.24.1	非递归 CIC 滤波器	479
13.24.2	非递归素数 R 因子 CIC 滤波器	481
13.25	平滑脉冲噪声	482
13.26	有效的多项式估计	484
13.26.1	浮点 Horner 准则	484
13.26.2	二进制移位乘、除法中的 Horner 准则	484
13.26.3	Estrin 方法	485
13.27	高阶 FIR 滤波器的设计	485
13.28	采用 FFT 的时域内插	488
13.28.1	实信号内插方法	488
13.28.2	解析信号内插计算	489
13.29	采用抽取进行频率变换	490
13.29.1	采用抽取方法的实信号变换	490
13.29.2	采用抽取方法的复信号变换	491
13.30	自动增益控制 (AGC)	491
13.31	近似包络检波	492
13.32	正交振荡器	494
13.33	专业化指数平均	495
13.33.1	单乘法器指数平均器	496
13.33.2	无乘法器指数平均器	496
13.33.3	双模平均器	497
13.34	用零值滤波器过滤窄带噪声	497
13.35	信号方差的高效计算	501
13.36	信号均值和方差的实时计算	502
13.36.1	计算移动均值和方差	502
13.36.2	计算指数移动均值和方差	504
13.37	利用半带滤波器构建希尔伯特变换器	505
13.37.1	半带滤波器的频率转换	505
13.37.2	半带滤波器的系数调制	506