

PEARSON

数字信号处理 及MATLAB仿真

[美] Dick Blandford 著
John Parr

陈后金 李居朋 姚畅 李艳凤 译

*Introduction to
Digital Signal
Processing*

INTRODUCTION TO
DIGITAL
SIGNAL
PROCESSING

DICK BLANDFORD
JOHN PARR



机械工业出版社
China Machine Press

数字信号处理 及MATLAB仿真

[美] Dick Blandford 著
John Parr

陈后金 李居朋 姚畅 李艳凤 译



*Introduction to
Digital Signal
Processing*

INTRODUCTION TO
DIGITAL
SIGNAL
PROCESSING

DICK BLANDFORD
JOHN PARR



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

数字信号处理及 MATLAB 仿真 / (美) 布兰福德 (Blandford, D.), (美) 帕尔 (Parr J.) 著; 陈后金等译. —北京: 机械工业出版社, 2015.1

(国外电子与电气工程技术丛书)

书名原文: Introduction to Digital Signal Processing

ISBN 978-7-111-48388-5

I. 数… II. ①布… ②帕… ③陈… III. 数字信号处理 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 249995 号

本书版权登记号: 图字: 01-2012-7772

Authorized translation from the English language edition, entitled *Introduction To Digital Signal Processing*, 1E, 9780131394063 by Blandford, Dick; Parr, John, published by Pearson Education, Inc., Copyright © 2013.

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 China Machine Press Copyright © 2015.

本书中文简体字版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权机械工业出版社在中华人民共和国境内 (不包括中国台湾地区和香港、澳门特别行政区) 独家出版发行。未经出版者书面许可, 不得以任何方式抄袭、复制或节录本书中的任何部分。

本书封底贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 无标签者不得销售。

本书讲述基本的数字信号处理知识, 主要内容包括数字滤波器、离散时间信号、离散时间系统、频率响应、抽样与重建、FIR 滤波器、IIR 滤波器、抽样速率转换、DSP 的实现、数字音频系统、二维数字信息处理、小波分析等。本书适合作为电子与计算机工程专业学生的中高级课程教材, 同时也适合希望自学 DSP 的工程师阅读。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 谢晓芳

责任校对: 董纪丽

印 刷: 北京诚信伟业印刷有限公司

版 次: 2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm×260mm 1/16

印 张: 31

书 号: ISBN 978-7-111-48388-5

定 价: 95.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

出版者的话

文艺复兴以降，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域中取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，信息学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅擘划了研究的范畴，还揭示了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的信息产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对我国教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短的现状下，美国等发达国家在其信息科学发展的几十年间积淀和发展的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀教材将对我国教育事业的发展起到积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与 Pearson、McGraw-Hill、Elsevier、John Wiley & Sons、CRC、Springer 等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出 Thomas L. Floyd、Charles K. Alexander、Behzad Razavi、John G. Proakis、Stephen Brown、Allan R. Hambley、Albert Malvino、Mark I. Montrose、David A. Johns、Peter Wilson、H. Vincent Poor、Dikshitulu K. Kalluri、Bhag Singh Guru、Stephane Mallat 等大师名家的经典教材，以“国外电子与电气工程技术丛书”为总称出版，供读者学习、研究及珍藏。这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也越来越多被实施双语教学的学校所采用。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑，这些因素使我们的图书有了质量的保证。随着电气与电子信息学科建设的不断完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外电气与电子信息教材的需求和应用都将步入一个新的阶段，我们的目标是尽善尽美，而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzsj@hzbook.com

联系电话：(010) 88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章教育

华章科技图书出版中心

译者序

20 世纪以来, 电子信息技术得到了迅速发展, 数字化与信息化已深刻影响并改变着我们的生存和发展方式。数字信号处理课程是电子与电气信息类学科专业的核心课程, 相关的原理和技术是通信与控制等诸多学科的基础。由于工业化起源于欧美国家, 催生了其在电子与电气信息领域有着诸多的发现和发明, 特别对信息技术的发展发挥了重要作用。因此, 我们需面向世界和未来, 引进国外优秀的教学素材, 借鉴其先进的教学理念和课程体系, 在教学实践中结合国内高等教育的特点, 以期提高课程教学效果和人才培养质量。

机械工业出版社引进了系列化的国外教材, 本教材由美国 Dick Blandford 和 John Parr 教授主编。该教材体系结构清晰, 内容翔实丰富, 特别注重理论技术与工程实际的紧密结合。教材中示例和案例选材得当, 有助于读者理解相关内容并有助于引导读者尝试应用。在翻译该教材的过程中, 充分领会原作者的教学意图, 并结合自身多年教学经验对部分文字或内容进行了适当意译或修改(英文原书更像是教学手稿, 存在百余处文字错误或表述瑕疵, 中文翻译版已全部校正), 以达精益求精, 期望此教材译本对读者有所裨益, 对国内相关教材建设具有积极影响。

全书共 11 章, 其中第 1 章、第 10 章和附录由姚畅翻译, 第 8 章和第 9 章由李居朋翻译, 第 4 章和第 7 章由李艳凤翻译, 其余内容由陈后金翻译, 并对全书译稿进行了统稿和校核。此外, 韩振中、曹霖、陈通、刘睿欣和李冰洁也在书稿翻译中给予了很多帮助, 在此一并表示感谢。

陈后金

2014 年 8 月



前言

历史背景

像许多电子工程课程一样,数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)最初是一门研究生课程,近30年来,其逐渐向本科课程渗透,成为电子与计算机工程的本科课程。由于技术的发展,DSP的应用无处不在,这也是其成为本科课程的主要原因之一。大多数的汽车、几乎每一个家庭、我们随身携带的很多个人物品都包含DSP的应用。在一些本科课程中,DSP通常作为高年级的选修课。在很多教学大纲中,DSP课程已成为必修课,或者集成到其他必修课中,作为其中的一部分。

概述

本书主要作为电子与计算机工程专业学生的专业课教材,同时也适合作为对DSP不太了解的工程师的自学教材。我们写这本书的目的在于,我们认为电子与计算机工程专业的本科生有必要学习DSP的导论性课程。在写这本书的过程中,我们假设学生已经掌握了差分方程和线性信号与系统的相关知识。

本书的核心在于介绍DSP中的基本概念,这些概念是电子与计算机工程系的每个学生应该理解的。这些核心是以伊凡斯维尔大学大三第二学期学生在该课程学习中遇到的问题为基础的,核心内容主要在前7章体现。我们建议以本书为教材的课程包含前7章的内容,可选择性地增加一或两章后面章节的内容。

同时,我们建议将本书作为本科生DSP相关课程学习的最后一门课程,只有少数学生会继续深入研究这个领域,大部分学生将会研究微电子、计算机、电力系统等。本书侧重于应用,建议在课程中给学生提供相应的实验室,并布置一些与实验相关的作业。

MATLAB在本书中应用很多,在实际编程中,我们一般使用C语言或者其他类似的语言,但在该课的教学中,使用MATLAB仿真。在本书中,我们也完成了C语言编程的几个例子,这些例子可在32位微控制器或专用的DSP系统平台上运行。

本书每章后面的习题设置与大多数教材有所不同,除了标准的分析设计题外,我们增加了大量的概念题。分析设计题的答案一般为数值、图或设计,而概念题的答案一般是一些定性的解释。增加概念题的目的在于,我们希望学生不仅能做数学计算,而且对DSP系统的开发有直接的认识。

内容安排

前7章主要包含电子与计算机工程师应该了解的基本数字信号处理知识,我们希望使用本书的每个人理解这7章,同时对于讲授课程的老师来说,建议按照章节的顺序进行讲解。但对于侧重使用DSP硬件的老师来说,将第4章放在第5章和第6章的后面也是可行的,这样的好处是能让学生对DSP硬件有更多的了解,不足之处是学生在了解抽样过程之前就使用了这个概念。

第1章是对DSP的简单介绍,包含DSP的概述、一些注意事项和一个双线性变换求导的例子,回答了“什么是数字滤波器”的问题,一般在课程的第一天讲解该章。

第2章和第3章包含基本的线性信号和系统概念,是后面章节的基础。第2章介绍离散时间信号和系统的特点与性质,该章节涉及较少新的概念,大部分为介绍性知识,一般用两节课的时间可以讲完。第3章介绍频率响应的基本概念,该章由傅里叶级数出发,引出傅里叶变换、离散时间傅里叶变换、离散傅里

叶变换、拉普拉斯变换和 z 变换。对于大多数的学生来说，可以粗略地阅读该章的大部分，但是对 z 变换可能需要引起较多的重视，该章一般需要 4~7 个学时。

第 4 章介绍了抽样和重建，该章包含模-数转换、 δ - Δ 转换器、抗混叠滤波器、过抽样、抗镜像滤波器和信号重建，一般需要 3 个学时。对于使用硬件实验室的老师来说，学生可以进行包含抽样理论、混叠、模-数转换和数-模转换的相关实验。

第 5 章和第 6 章介绍数字滤波器的分析和设计，首先第 5 章介绍 FIR 滤波器，IIR 滤波器在第 6 章介绍，重点应放在使用标准方法对 FIR 与 IIR 滤波器进行设计。这两章包含经典的滤波器设计，如窗函数法、帕克斯-麦克莱伦法、脉冲响应不变法、巴特沃斯滤波器、切比雪夫滤波器、双线性变换以及 IIR 滤波器的直接设计，这两章至少需要 20 个学时。对于使用硬件系统的老师来说，学生应该编写相应的程序在所设计的滤波器系统上运行。

第 7 章介绍多速率 DSP，主要包括抽取、内插、抽样速率转换和多速率 DSP 系统的应用，该章节较短，可用 3 个学时完成。

对于对 DSP 要求不高的课程来说，剩下的 5~7 个学时可进行选择性讲解，第 8~11 章为 DSP 系统的应用，为前 7 章的理论知识提供应用的领域，每一章都是独立的，仅和前 7 章的内容相关。第 8~11 章的顺序可以是任意的，一般仅需包含一到两章即可。

第 8 章讨论 DSP 的实现，包含 FIR 和 IIR 实现过程中速度和位数的限制，定点和浮点操作，量化误差和噪声，同时提供一些例题。所有代码是以 C 或类似语言编写的。

第 9 章介绍数字音频系统，该章强调 MATLAB 的非实时应用，主要内容为音频滤波器、过抽样、混响、量化和其他音效。MATLAB 可以读取和写入 wav 文件，可以有效地对该章的例题进行验证。

第 10 章介绍二维数字信号处理，该章节以二维傅里叶变换和二维快速傅里叶变换开始，同时介绍二维离散余弦变换 (DCT)。该章仅对傅里叶变换进行了简要的介绍，剩下的大部分用来介绍二维 FIR 滤波器。该章使用 MATLAB 的图像处理工具箱。

第 11 章介绍小波分析，重点介绍 Haar 小波，尽管在实际应用中很少使用 Haar 小波，但其很容易理解。该章还介绍能量紧支撑和多分辨率分析，Daubechies 小波在去噪和信号压缩中的应用。该章的主要目标是让学生对小波的应用有一定的了解。该章还介绍连续小波变换和离散小波变换，使用了 MATLAB 的小波工具箱。

附录介绍本书的一些相关资料。

附录 A 介绍模拟滤波器设计，大多数 IIR 滤波器设计需要依赖模拟滤波器的设计，之后使用映射函数将 s 域映射到 z 域。附录对经典滤波器（巴特沃斯、切比雪夫和椭圆滤波器）的设计进行了概述，之后介绍了拉普拉斯域的传输函数。

附录 B 提供每章主要的参考文献。

附录 C 提供数学背景知识，包括矩阵操作和基本状态变量方程。

附录 D 列出每一章中使用到的 MATLAB 函数，及其相应的介绍。

本书还提供了部分习题的答案。

致谢

作者首先感谢 James Reising 在本书撰写过程中的支持和鼓励，Jim 对每个章节进行了校对并提出了许多有用的意见，作者对此表示感谢。作者同时感谢在过去十年中学习 EE 311 课程的学生，他们提供了很多独特的见解，这些见解在帮助学生理解离散时间系统和数字信号处理概念有很大帮助。我们还要感谢我们的妻子，Ann 和 Judith，本书的完成与她们的支持和鼓励分不开。

作者对审阅本书内容的审稿人表示感谢：

Ikhlas Abdel-Qader, 西密歇根大学 (Western Michigan University)

Mahmood Nahvi, 加州理工州立大学圣路易斯奥比斯波分校 (California Polytechnic State University-San Luis Obispo)

Zhi Ding, 加州大学戴维斯分校 (University of California-Davis)

David Salvia, 宾州州立大学 (Penn State University)

Alan Chiu, 路易斯安那理工大学 (Louisiana Tech University)

Jason Trobaugh, 圣路易斯华盛顿大学 (Washington University in St. Louis)

Michael Wakin, 科罗拉多矿业大学 (Colorado School of Mines)

推荐阅读



中文版
第6版

作者: Abraham Silberschatz 著
中文翻译版: 978-7-111-37529-6, 99.00元
本科教学版: 978-7-111-40085-1, 59.00元



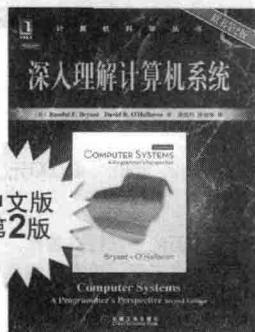
中文版
第3版

作者: Jiawei Han 等著
中文版: 978-7-111-39140-1, 79.00元



中文版
第3版

作者: Ian H. Witten 等著
中文版: 978-7-111-45381-9, 79.00元



中文版
第2版

作者: Randal E. Bryant 等著
书号: 978-7-111-32133-0, 99.00元



中文版
第4版

作者: David A. Patterson John L. Hennessy
中文版: 978-7-111-35305-8, 99.00元



中文版
第6版

作者: James F. Kurose 著
书号: 978-7-111-45378-9, 79.00元



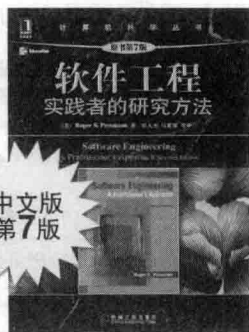
中文版
第3版

作者: Thomas H. Cormen 等著
书号: 978-7-111-40701-0, 128.00元



中文版
第2版

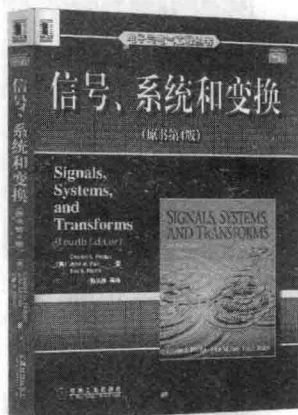
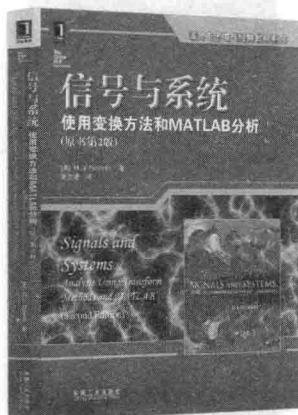
作者: Brian W. Kernighan 等著
书号: 978-7-111-12806-0, 30.00元



中文版
第7版

作者: Roger S. Pressman 著
书号: 978-7-111-33581-8, 79.00元

推荐阅读



自适应信号处理

作者: Bernard Widrow 等 译者: 王永德 等 ISBN: 978-7-111-22792-2 定价: 45.00元
英文版 ISBN: 978-7-111-23918-5 定价: 56.00元

本书是一本有关自适应信号处理的专业性教科书,也是自适应信号处理方面的一部经典著作。本书主要内容包括自适应信号处理的原理、算法和结构以及在各种领域的应用。全书在理论方面侧重讨论线性组合器这种基本的自适应结构形式,以及LMS(最小均方)算法这种重要且基本的自适应算法;在应用方面,重点讨论自适应信号处理在系统辨识、解卷积、信道均衡、自动控制、干扰对消及空间阵列处理等方面的应用。

信号与系统: 使用变换方法和MATLAB分析 (原书第2版)

作者: M. J. Roberts 译者: 胡剑凌 预计出版时间: 2013年6月

本书在第1版的基础上进行了广泛更新,包含系统的时域分析、傅里叶方法、傅里叶变换、拉普拉斯变换、z变换、采样和信号处理等信号与系统的基本理论 and 应用。新增加频率响应分析、通信系统分析、滤波器的分析与设计、状态空间分析4章内容。全书给出了大量的例子,并介绍实现上述方法的MATLAB函数和运算。

信号、系统和变换 (原书第4版)

作者: Charles L. Philips 等 译者: 陈从颜 ISBN: 978-7-111-26047-9 定价: 78.00元
英文版 ISBN: 978-7-111-26894-9 定价: 55.00元

本书清晰而全面地叙述了关于信号、系统和变换的理论与应用。介绍了信号与系统的数学背景,主要包括:傅里叶变换、傅里叶级数、拉普拉斯变换、离散时间傅里叶变换与离散傅里叶变换,z变换。本版在课程体系的组织上为读者不同的侧重需求提供了极大的灵活性。MATLAB示例贯穿于书中各章,同时也将MATLAB学生版本的先进特征体现于例题和习题的应用之中。

目 录

出版者的话

译者序

前 言

第 1 章 概述 1

1.1 什么是数字滤波器 2

1.2 分析与设计概述 10

习题 12

第 2 章 离散时间信号 15

2.1 离散时间信号和系统 16

2.2 离散时间信号的变换 20

2.3 离散时间信号的特性 24

2.4 常见的离散时间信号 28

2.5 离散时间系统 32

2.6 离散时间系统的卷积 35

小结 43

习题 43

第 3 章 频域概念 48

3.1 正交函数和傅里叶级数 49

3.2 傅里叶变换 54

3.3 离散时间傅里叶变换 61

3.4 离散傅里叶变换 65

3.5 快速傅里叶变换 68

3.6 拉普拉斯变换 75

3.7 z 变换 79

小结 92

习题 92

第 4 章 抽样与重建 99

4.1 连续时间信号抽样 100

4.2 抗混叠滤波器 102

4.3 抽样过程 105

4.4 A/D 转换 106

4.5 D/A 转换 114

4.6 抗镜像滤波器 116

习题 119

第 5 章 FIR 滤波器设计与分析 124

5.1 滤波器设计指标 124

5.2 FIR 滤波器设计的基本原理 125

5.3 高级窗函数 139

5.4 频率抽样 FIR 滤波器 144

5.5 FIR 滤波器的帕克斯-麦克莱伦
设计技术 148

5.6 最小相位 FIR 滤波器 154

5.7 应用 157

5.8 FIR 滤波器小结 165

习题 165

第 6 章 IIR 滤波器设计与分析 174

6.1 利用双线性变换法设计 IIR
滤波器 174

6.2 IIR 滤波器的稳定性 180

6.3 频率变换 182

6.4 经典 IIR 滤波器 185

6.5 IIR 滤波器在 z 平面的极点和
零点 196

6.6 IIR 滤波器的直接设计 198

6.7 IIR 滤波器的应用 208

小结 217

习题 217

第 7 章 抽样速率转换 228

7.1 整数抽取 228

7.2 整数内插 232

7.3 有理数倍抽样速率转换 236

7.4 FIR 数字滤波器的实现 237

7.5 窄带滤波器 243

7.6 任意数值的抽样速率转换 244

7.7 带通抽样 245

7.8 过抽样在音频中的应用 247

小结 248

习题 248

第 8 章 数字滤波器的实现	253	10.2 二维变换	340
8.1 实施问题	253	10.3 二维 FIR 滤波器	357
8.2 数字表示	254	小结	368
8.3 实现结构	257	习题	369
8.4 系数量化误差	268	第 11 章 小波简介	377
8.5 输入量化产生的输出误差	272	11.1 概述	377
8.6 乘积量化	274	11.2 STFT	380
8.7 量化和抖动	275	11.3 小波及其连续小波变换	382
8.8 溢出和缩放	277	11.4 小波变换数据的解释	392
8.9 极限环	280	11.5 NDWT	396
8.10 微控制器 DSP	285	11.6 DWT	399
习题	292	小结	413
第 9 章 数字语音信号	300	习题	414
9.1 语音信号的性质	300	附录 A 模拟滤波器设计	420
9.2 语音文件编码	300	附录 B 参考文献	429
9.3 音频文件格式	306	附录 C 数学背景	433
9.4 音效	307	附录 D MATLAB 用户自定义 函数和命令	437
小结	333	部分习题答案	453
习题	333		
第 10 章 二维数字信号处理 简介	337		
10.1 二维信号的表示	337		

第1章

概述

过滤器可以定义为这样一种设备,其通过处理输入数据可获得期望的输出数据,且输出数据具有某种共同的特征。日常生活中过滤器无处不在,只是我们没有留意。汽车通常安装有燃油过滤器、空气过滤器以及机油过滤器,它们可以相应地分离出对发动机有害的污染物,并将分离出的污染物滤除。收音机上的调谐盘通过调节过滤器可从不同频率的无线电波中分离出我们感兴趣的频段,提取出对应该频段的原音频信号,从而使我们听到广播,而没有被选中的其他频段则被滤除。我们的身体也有着许多的过滤器,如从血液中分离出代谢废物的肾脏,从食物残渣中吸收营养物质的小肠等。其中大脑是一个更为特殊的过滤器,它对接收到的来自各个感觉器官的庞大信息进行处理,然后做出相应的感知。通常,我们大脑所进行的大部分信息过滤处理不易察觉。例如,我们从手机通讯录中查找联系人可以看作是一种过滤操作,同样,在嘈杂的房间里与人交谈也是大脑对信息的过滤处理。

过滤器涉及的领域十分广泛,本书将仅对电信号中的数据过滤处理进行分析讨论,并将过滤器称为滤波器(filter)。关注信号频域滤波的原因主要有以下三个方面:

1. 特定信息的提取,需要从整个频率信号中分离出某一特定的频率或频段。例如,电视机的频道选择器通过调节滤波器从而提取特定电视台的频段信号。
2. 信号特征的增强,需要滤除给定信号中的噪声或干扰。例如,慢跑者佩戴的心率监测器采用低通滤波器滤除来自身体各个器官感知到的外部环境高频信号干扰,使得心脏跳动信号获得增强。
3. 信号的多角度分析,需要将信号从一种形式变换为另一种形式。基于傅里叶变换的频谱分析仪就是很好的例子,通过变换可以观察到时域信号的频率成分。

不难看出,上述第1项和第2项与滤波器相关,但第3项与信号变换相关。实际上,大多数人喜欢采用更通用的术语——数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP),而将数字滤波器看作是一种特定形式的数字信号处理。本书将采用这种观点。

依据待处理信号的种类,滤波器一般可以分为模拟滤波器和数字滤波器。模拟滤波器因早期无线电的发展而遍布全球,它的发明主要归功于贝尔实验室的乔治·坎贝尔(George Campbell)。模拟滤波器可以像电阻器和电容器一样简单,最显著的特征是其处理的信号在时间和幅度上均是连续的,可表示为 $y=f(t)$,信号在任意时刻 t 都有相应的 y 值定义,并且(理论上) y 可以取到任意实数值。数字滤波器则是对离散时间信号进行处理,此类信号可以表示为 $y=f(nT)$,其中 n 为整数,常数 T 称为抽样间隔。这里, y 只在 T 的整数倍(T 、 $2T$ 、 $3T$...)时间点取值,在 $nT\sim(n+1)T$ 之间的时刻没有定义值。实际应用中 y 的幅度也是离散的。例如,如果滤波器系数采用8位二进制数表示,那么 y 只能取 $2^8=256$ 个离散值。

离散时间信号处理已经有很久的历史,甚至早于连续时间信号处理。然而,大部分学者将库利(Cooley)和图基(Tukey)在1968年首次提出的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法作为数字信号处理诞生的标志^①。FFT算法使得计算机在合理的时间内计算出一个复杂信号的频谱成为可能。

① 快速傅里叶变换在3.5节有详细介绍。

今天, DSP 在许多领域都得到了广泛应用, 例如雷达和声呐、生物医学信号分析、语音处理、通信应用、图像处理、音乐存储和处理、地震数据处理、数字电视等。在过去的 50 年里, 随着高速、低成本计算机和存储设备的出现, DSP 的应用出现了空前的繁荣。

现实世界中大部分信号都是模拟信号, 为了获得数字信号, 必须首先经过抽样和量化将模拟信号转变成为二进制数。其中量化器就是模/数转换器(A/D), 抽样器是用来捕获某一时刻模拟信号样本的电子开关。连续两次抽样之间的时间间隔 T 称为抽样间隔, 抽样间隔的倒数称为抽样频率: $f_s = 1/T$ 。

数字信号处理器接收经过抽样和量化后的二进制串数据, 每个抽样信号对应一串二进制数。获得抽样数据之后, 数字信号处理器执行一系列的数值运算, 通常包括乘法、加法和移位运算。此外, 处理器同时存储抽样值, 包括当前的抽样值、历史输入和输出的抽样值。运算完成后, 处理器通常将处理结果通过数/模转换器(D/A)输出。数/模转换器将二进制数据转换为时间和幅度上离散的信号, 经重建滤波器, 信号平滑处理为时间和幅度连续的模拟信号。抽样间隔的选择是该处理过程的关键, 原因在于所有运算必须在一个抽样间隔内完成才可实现相应的处理。

数字信号处理过程听起来十分简单, 但实际上许多问题伴随着处理过程而出现。傅里叶级数、傅里叶变换和 z 变换是了解处理过程的基础, 这些基本理论将在本书第 2 章和第 3 章详细论述。模拟信号的抽样和量化将导致信号失真, 例如频谱混叠。量化过程产生量化误差, 正确设置抽样频率和量化级数是设计的关键, 本书第 4 章将对此进行讨论。

数字滤波器可用差分方程表示为

$$y[n] = b_0 x[n] + b_1 x[n-1] + \cdots + b_M x[n-M] + a_1 y[n-1] + a_2 y[n-2] + \cdots + a_N y[n-N]$$

其中, x 为输入变量, y 为输出变量, N 、 M 、 a_i 和 b_i 为常数。因此, 数字滤波器的设计就是确定这些系数取值。当所有系数 a_i 为零时, 滤波器称为有限脉冲响应(Finite Impulse Response, FIR)滤波器, 设计方法将在第 5 章讨论。对于更一般的情况, 当系数 a_i 不全为零时, 滤波器称为无限脉冲响应(Infinite Impulse Response, IIR)滤波器, 设计方法将在第 6 章进行详细讨论。现代 DSP 系统中, 数字信号可由不同的抽样频率获得, 多种抽样频率间的转换将在第 7 章讨论。

本书前 7 章主要介绍数字信号处理的基础理论, 第 8 章讨论滤波器的实现, 如量化误差、溢出和滤波器结构等。实现是将设计转变成实际可用的滤波器的过程。随着新技术的日新月异, 滤波器的实现也在不断发展。

本书最后 3 章主要探讨数字信号处理的应用。第 9 章主要介绍 DSP 在语音信号处理中的应用; 第 10 章将对二维信号处理应用进行讨论; 小波是 DSP 发挥重要作用的一个新领域, 第 11 章将对此进行讨论。接下来将通过具体实例说明“什么是数字滤波器”, 内容将涉及部分数学推导和直观认知。

1.1 什么是数字滤波器

若要回答这个问题, 首先要建立一个简单的模拟滤波器的概念, 然后再来说明怎样将模拟滤波器转换成数字滤波器。图 1.1 所示为一个 RC 电路构成的模拟低通滤波器, 低频模拟信号可以顺利通过而高频模拟信号的幅度将被衰减。这是因为电路中电容容抗具有随通过的电流频率增加而降低的特性。高频电流通过时, 电容容抗很小, 近似短路, 因而当输入电流的频率上升时, 输出电压 v_o 瞬间变得很小。

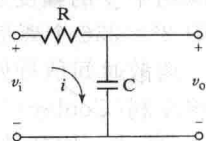


图 1.1 RC 电路构成的低通滤波器

1.1.1 模拟电路的分析

分析图 1.1 中的 RC 模拟低通滤波器电路可以采用多种方法。在时域可通过微分方程

建立输出电压与输入电压之间的关系:

$$\begin{aligned} v_o &= v_c \\ v_i &= iR + v_c \\ i &= C \frac{dv_c}{dt} = \frac{Cdv_o}{dt} \end{aligned}$$

可得

$$\frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{RC} = \frac{v_i}{RC} \quad (1.1)$$

要计算出电路的正弦频率响应, 首先将输入写成复指数形式

$$v_i = e^{j\omega t} \quad (1.2)$$

利用复指数信号在运算中的数学便利性, 式(1.1)可写为

$$\frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{RC} = \frac{1}{RC} e^{j\omega t}$$

可得微分方程的解为

$$v_o = K \cdot e^{-t/RC} + \frac{e^{j\omega t}}{1 + j\omega RC} \quad (1.3)$$

式(1.3)右边第一项为瞬态响应, K 的取值由初始条件决定, 第二项为输入正弦信号的稳态响应。由于此为线性系统, 因此输出信号的频率将与输入信号的频率相同, 但幅度和相位与输入信号不同。

如果我们定义电路的增益为输出与输入之比, 那么可画出稳态响应时增益的幅频特性曲线和相频特性曲线。由于输入的幅度恒为 1, 因此整个电路增益的幅度和相位取决于输出。

$$\text{增益的幅度} = |H(j\omega)| = \left| \frac{1}{1 + j\omega RC} \right| \quad (1.4)$$

$$\text{增益的相位} = 0 - \angle(1 + j\omega RC) = -\angle(1 + j\omega RC) \quad (1.5)$$

与期望的结果一致, 从图 1.2 可看出滤波器在低频时的增益接近于 1, 而在高频时的增益趋于 0。

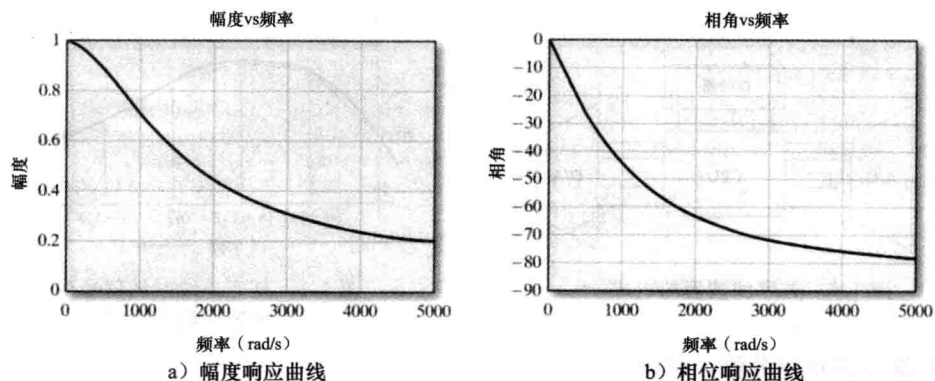


图 1.2 幅度和相位响应曲线

同样, 通过计算微分方程瞬态响应可以获得电路对标准测试信号(如单位阶跃信号)的响应。图 1.3 所示为电路的阶跃响应。

相似的结果也可通过拉普拉斯变换获得。

1.1.2 数字滤波器的原理

构建替换模拟滤波器的数字滤波器所需的组成部分如图 1.4 所示。模拟信号从左侧输

入,经过滤波处理后从右侧输出。输入和输出之间的电路部分主要对模拟信号进行抽样并转换成数字信号,然后采用相应的数值算法进行滤波,最后将滤波后的数字信号转化成模拟信号。通过分析此电路可以发现,由于在抽样和数值运算过程中计算机产生误差,滤波后的模拟信号只是图 1.1 中 RC 电路输出结果的近似。

下面通过分析其各个部分来了解数字滤波器的工作原理。输入电压 v_i 通过左侧的抽样器进行抽样。抽样间隔为 T 秒,则抽样频率为

$$f_s = \frac{1}{T}$$

每个抽样值保持 T 秒,直至下一个抽样的到来。在这段时间里,A/D 转换器将模拟信号转换成数字,通常为 10~12 位的二进制数。然后处理器(CPU)采用相应的算法对这些二进制数进行滤波处理。

下面通过两种简单的数字滤波器设计来理解算法如何实现信号的滤波。这两种滤波器的性能与图 1.1 中的模拟滤波器相似。一种设计是将描述 RC 电路的微分方程转换为差分方程,然后利用处理器实现滤波。此种构造的滤波器存在反馈项,称为无限脉冲响应(IIR)数字滤波器。第 6 章将对此进行详细介绍。另一种设计是用 RC 电路的冲激响应来构建与之有相似脉冲响应的离散时间滤波器。这种滤波器没有反馈项,称为有限脉冲响应(FIR)数字滤波器,将在第 5 章详细介绍。

1.1.3 一种简单的 IIR 数字滤波器设计方法

利用数字计算机实现 IIR 数字滤波器,需要将时域连续的微分方程转换为差分方程。目前有多种转换方法,结果各异。其中一种简易的方法是先将微分方程转换为积分方程,然后采用离散求和方法求解积分。图 1.5 所示为一个任意连续时间信号,要计算出该信号的积分,可以通过对图 1.5 中所示的每个小梯形面积求和来近似。

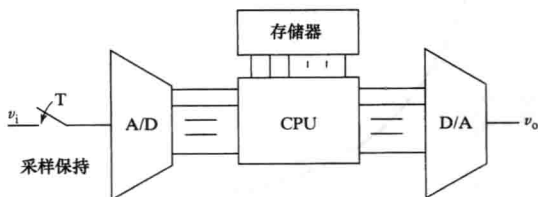


图 1.4 数字滤波器的组成

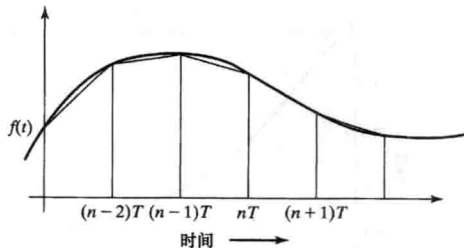


图 1.5 任意连续时间信号积分的梯形面积求和近似

用变量 y 表示积分值,可得

$$y(nT) = \int_0^{nT} f(t) dt \quad (1.6)$$

上式可以分解为两个独立部分的和,即

$$y(nT) = \int_0^{(n-1)T} f(t) dt + \int_{(n-1)T}^{nT} f(t) dt$$

或

$$y(nT) = y([n-1]T) + \int_{(n-1)T}^{nT} f(t) dt \quad (1.7)$$

式(1.7)中,积分可以近似为 $(n-1)T \sim nT$ 之间梯形的面积。该梯形高为 T ,上底与下底之和为 $[f(nT) + f([n-1]T)]$ 。式(1.7)可写为

$$y(nT) = y([n-1]T) + (T/2)[f(nT) + f([n-1]T)] \quad (1.8)$$

下面将微分方程(1.1)转换为积分方程

$$\begin{aligned} \frac{dv_o}{dt} + \frac{v_o}{RC} &= \frac{v_i}{RC} \\ v_o + \frac{1}{RC} \int v_o dt &= \frac{1}{RC} \int v_i \cdot dt \end{aligned}$$

或

$$v_o = \frac{1}{RC} \int (v_i - v_o) \cdot dt \quad (1.9)$$

为得到差分方程,运用式(1.8)的结果做如下代换:

$$v_o(t) \Rightarrow v_o(nT)$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{RC} \int (v_i - v_o) \cdot dt &\Rightarrow v_o([n-1]T) + \frac{T}{2RC} [v_i(nT) - v_o(nT) + v_i([n-1]T) - v_o([n-1]T)] \\ &\Rightarrow \frac{T}{2RC} [v_i(nT) + v_i([n-1]T)] - \frac{T}{2RC} v_o(nT) + v_o([n-1]T) \left(1 - \frac{T}{2RC}\right) \end{aligned}$$

因而,式(1.9)可写为

$$v_o(nT) \left(1 + \frac{T}{2RC}\right) = \frac{T}{2RC} [v_i(nT) + v_i([n-1]T)] + \left(1 - \frac{T}{2RC}\right) v_o([n-1]T)$$

整理得

$$v_o(nT) = \frac{T}{2RC + T} v_i(nT) + \frac{T}{2RC + T} v_i([n-1]T) + \frac{2RC - T}{2RC + T} v_o([n-1]T) \quad (1.10)$$

抽样间隔 T 的大小不是任意的,其取值是DSP系统设计的关键,本书将在后面的章节中详细论述。本例中,取 $T=1.0\text{ms}$, $R=1\text{k}$, $C=1\mu\text{F}$,式(1.10)可写为

$$v_o(nT) = 0.3333v_i(nT) + 0.3333v_i([n-1]T) + 0.3333v_o([n-1]T) \quad (1.11)$$

式(1.11)即为得到的差分方程。从该式可以看出,在 nT 时刻的输出电压 v_o 可由当前时刻的输入电压、前一抽样时刻的输入电压和输出电压来表示。

差分方程可由图1.4中所示的CPU模块采用如下程序实现:

```
Initialize Variables
DO Forever
    Call A/D(Vi) ;Get a sample from the A/D
    Vo = K1*Vi + K2*Vi1 + K3*Vo1 ;K1 = K2 = K3 = 0.3333
    Call D/A(Vo) ;Output Vo to D/A
    Vo1 = Vo ;Reset the values of the old variables.
    Vi1 = Vi
    Wait for T seconds to pass
Loop
End
```

程序执行时,循环中的所有语句都必须在抽样间隔 T 秒内执行完毕。

每当一个新的抽样通过A/D转换器后,计算机将对转换后的二进制抽样值进行滤波并将结果发送给D/A转换器。D/A转换器将二进制的滤波结果转换成幅度离散的阶梯状波形信号,每个阶梯时间步长为 T 秒,如图1.6所示。

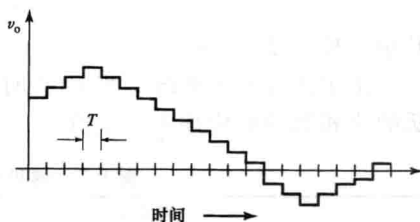


图1.6 D/A转换器输出的典型阶梯状电压信号