



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

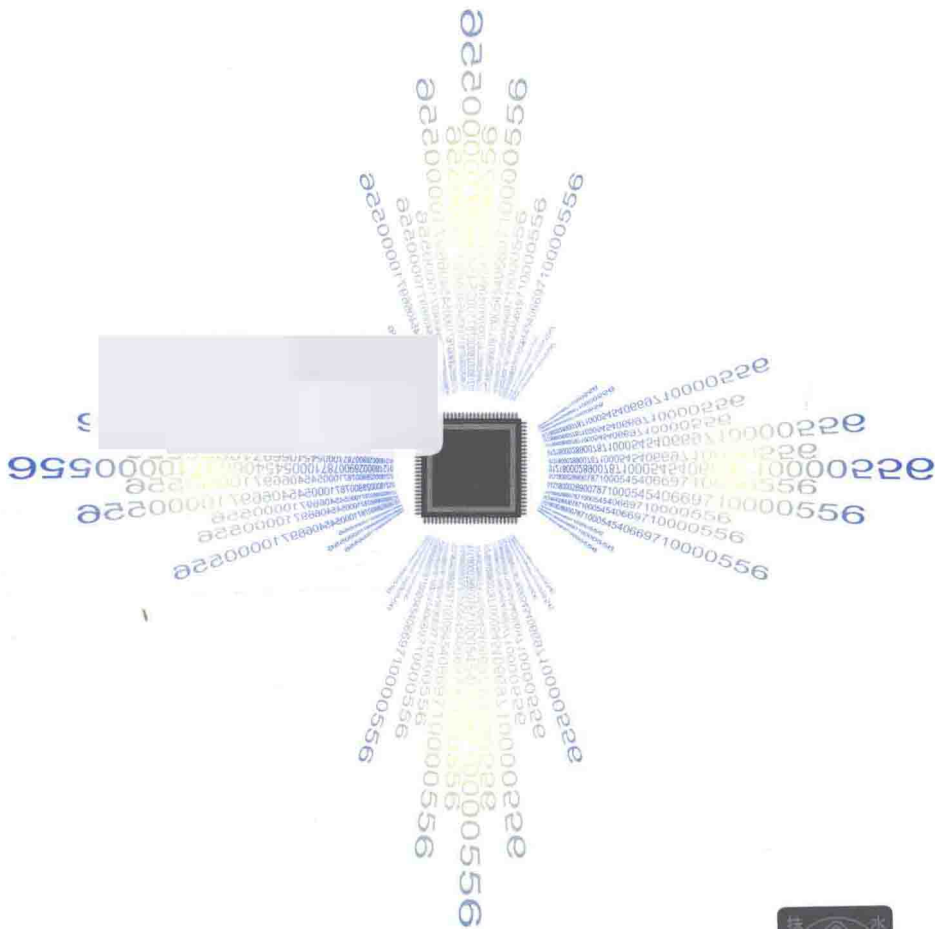
信息与通信工程

Digital Signal Processing

数字信号处理

王大伦 编著

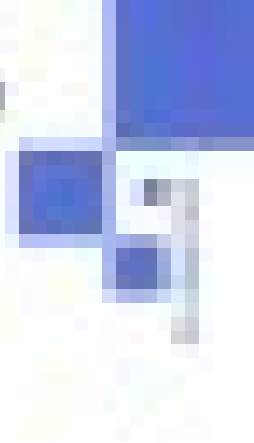
Wang Dalun



清华大学出版社



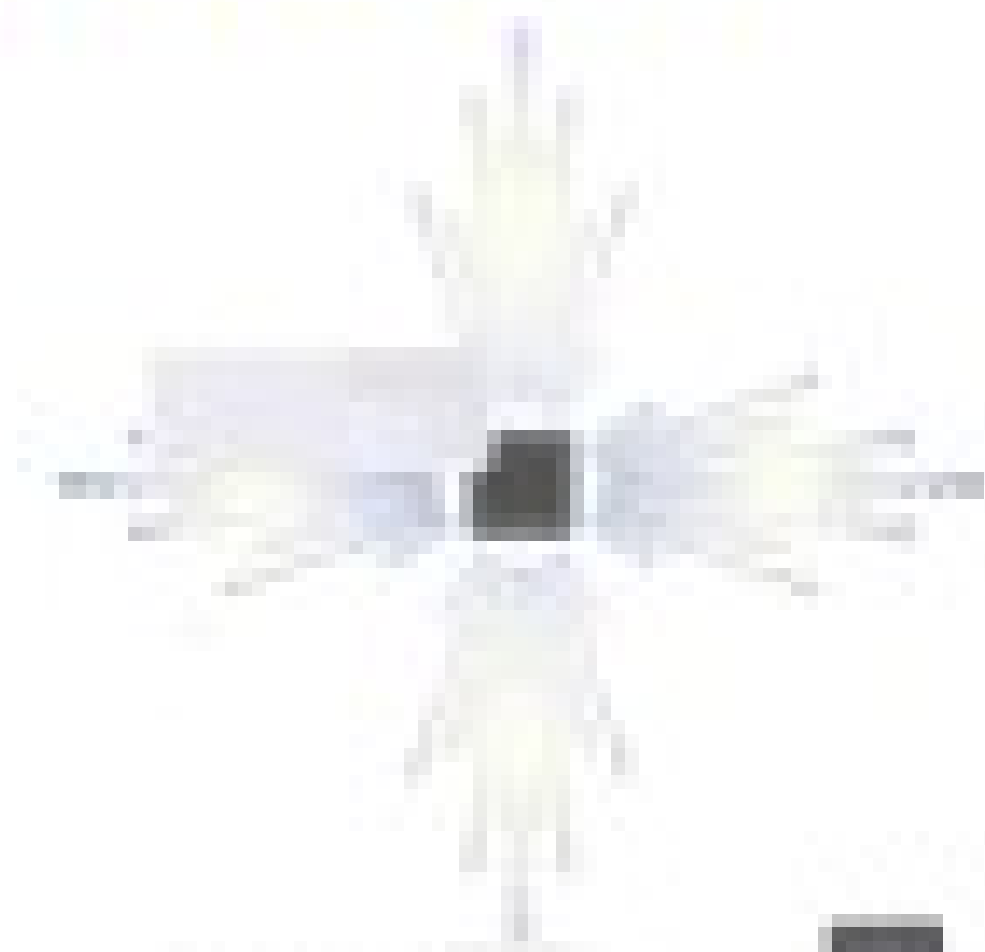
教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会
教育部高等学校信息类专业教学指导委员会



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会
教育部高等学校信息类专业教学指导委员会

数字信号处理

第2版



刘永坚 主编





教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

Digital Signal Processing

数字信号处理

王大伦 编著

Wang Dalun

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书是数字信号处理学科的入门教材,系统地介绍数字信号处理的基本理论、基本分析方法和设计方法。全书共分10章。前5章介绍离散时间系统与信号的基本理论和分析方法,从连续时间傅里叶变换逐步导出离散傅里叶变换及其快速算法。后5章介绍IIR和FIR数字滤波器的设计和实现,其中包括算法、实际结构、对有限字长效应的考虑以及多采样率系统的基本理论。

本书力求简明扼要,简化数学推导,书中的讨论前后呼应,理论密切联系实际是书中应有之义。本书配套提供大量MATLAB程序供读者上机,锻炼分析能力和实际操作能力;提供详细的教案,供老师们参考,并利于学生自学。本书适用于高等学校电子信息类相关专业的广大师生,也适合作为从事这一领域工作的工程技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/王大伦编著. —北京:清华大学出版社,2014

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-33043-1

I. ①数… II. ①王… 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(2013)第145954号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:梁毅

责任印制:宋林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:清华大学印刷厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:28.25 字 数:702千字

版 次:2014年9月第1版 印 次:2014年9月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.00元

产品编号:048421-01

高等学校电子信息类专业系列教材

一 顾问委员会

谈振辉	北京交通大学	(教指委高级顾问)	郁道银	天津大学	(教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学	(特约高级顾问)	胡广书	清华大学	(特约高级顾问)
华成英	清华大学	(国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学	(国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学	(国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学	(国家级教学名师)
邹逢兴	国防科技大学	(国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学	(国家级教学名师)

一 编审委员会

主任	吕志伟	哈尔滨工业大学			
副主任	刘旭	浙江大学	王志军	北京大学	
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学	
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学	
	刘向东	浙江大学			
委员	王志华	清华大学	宋梅	北京邮电大学	
	韩焱	中北大学	张雪英	太原理工大学	
	殷福亮	大连理工大	赵晓晖	吉林大学	
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学	
	洪伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学	
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学	
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学	
	曾云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学	
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学	
	谢泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学	
	吴瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学	
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学	
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学	
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学	
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学	
	李晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学	
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学	
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学	
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所	
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团	
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡毅	中国兵器科学研究院	
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学	
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学	
	李勇朝	西安电子科技大学	江毅	北京理工大学	
	章毓晋	清华大学	谢凯年	赛灵思公司	
	刘铁根	天津大学	张伟刚	南开大学	
	王艳芬	中国矿业大学	宋峰	南开大学	
苑立波	哈尔滨工程大学	靳伟	香港理工大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社			

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

PREFACE

本书凝聚作者对数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)课程的再学习成果,也可以说是作者的教学科研总结。

1977年,是令人难忘的一年!这一年,国内院校纷纷开设 DSP 课程,盛况空前。现在看来,这是中国为迎接信息化时代、极具前瞻性的战略部署,作者有幸躬逢盛事,从此与这个学科结下不解之缘。

按照完整的理解,所谓“数字信号处理”,就是用数字方法处理信号的技术。所以,注定要用计算机作为工具来教、来学这门课程。这是方向。但是,至少在 1990 年以前,把计算机充分用于 DSP 教学中,仍然是人们可望不可及的“梦想”。空谈理论,这是何等的无奈。作者曾经用 Z80 单片机的汇编语言写出 DSP 程序,但效率奇低;还用 BASIC、PASCAL、FORTRAN 等高级语言编写过稍微像样的 DSP 程序,仍很吃力。另一方面,DSP 原是从基础学科派生出来的新学科,但由于经验不足等原因,人们往往在教学中,把 DSP 课程与先修课程割裂开来。这样,DSP 课程就显得难教难学。人们对它心存敬畏,也在所难免。

随着计算机技术的发展,情况逐渐发生变化。但是,不同的国家有不同的差距。在 1992 年这个时间节点,情况是这样的:美国人普遍用 MATLAB 编程,开展效率极高的教学科研工作;德国人用 C 语言研究 DSP 算法,也颇有成果;而中国人的单板机开发热刚刚消散,个人计算机和 C 语言开始普及,但鲜有用于 DSP 的编程中。

2003 年之前,笔者致力于用 Visual Basic 6.0 编制具有良好界面的 DSP 程序集,小有成果。2003 年国内引入 MATLAB 后,笔者开始用 MATLAB 语言改写 DSP 程序,而且越写越有信心。后来,随着国家大政方针相继出台——我们面临建设创新型国家的历史任务,在市场经济条件下,用信息化带动现代化。在这样的时代背景下,作者深受鼓舞,并树立信心写成一套易教易学的数字信号处理教材。在清华大学出版社鼎力支持下,遂使本书得以面世。

要创新,首先要正确处理理论与实践的关系。作者秉承“实践出真知”这样的理念写出这套书。宗旨是让读者学起来有兴趣,有信心,学完这些书之后,得到的不是说不清、道不明的“知识”,而是逐鹿职场的能力,也即:解决实际问题的能力、善于思考问题的能力,以及可以持续发展的潜力。

本书内容分为如下 10 章:

第 1 章 走近 DSP

第 2 章 离散时间信号与系统

第 3 章 变换域中的离散时间系统

第 4 章 离散傅里叶变换

- 第 5 章 快速傅里叶变换
- 第 6 章 无限长冲激响应(IIR)数字滤波器设计
- 第 7 章 有限长冲激响应(FIR)数字滤波器设计
- 第 8 章 数字滤波器的结构
- 第 9 章 有限字长效应
- 第 10 章 采样率转换

为便于学习,本书配套制作了大量学习资源,包括 MATLAB 程序库和用以复习先修课程、拓宽视野的 10 个专题:

- 专题 1 MATLAB 入门
- 专题 2 信号变换基础——线性空间及正交变换的基本理论
- 专题 3 负频率
- 专题 4 傅里叶变换大家族
- 专题 5 状态变量分析法
- 专题 6 DFT 相当于一组滤波器
- 专题 7 Gibbs 效应
- 专题 8 FFT 的软件实现
- 专题 9 基于复调制的 Zoom-FFT 算法
- 专题 10 级联的积分器——梳状滤波器
- 专题 11 正余弦序列发生器
- 专题 12 离散余弦变换
- 专题 13 插值
- 专题 14 从 IIR 滤波到卡尔曼滤波
- 专题 15 作为线性时变系统的增采样器和减采样器
- 专题 16 采样率转换的一种重要应用——噪声整形技术简介

作者对本书有以下考虑。

(1) 将 DSP 课程与先修课程密切联系起来。在先修课程的基础上,可以深入浅出地阐明 DSP 的各种算法,可以大幅度删去不必要的数学推导,而仍然能够保持严谨性。例如,读者会承认傅里叶变换具有对偶性,由此很容易导出离散时间傅里叶变换,也容易理解这种变换的性质。把这种变换换个名字,就是时域采样定理。利用傅里叶变换的对偶性,就立即得到频域采样定理。把时域定理用到采样率转换系统中,几乎不需要做烦琐的数学推导就能搞懂采样率变换前后的频谱变化。信号重建、采样率变换等都是插值过程。可以用留数法把 Z 变换式展成部分分式。留数法涉及复平面,不容易理解。但先修课程已经讲过部分分式展开的待定系数法。此法与留数法是等价的。再者,在用分相法实现的增采样系统中,根据插值原理,无需过多的数学推导,就能求出各个子滤波器的滤波系数。

(2) 从 DSP 问世至今,已经历了 50 多年。在这期间,微电子技术和计算机技术的发展让人震撼。1960 年,Cooley J. W 和 Tukey J. W. 提出基-2 快速傅里叶变换算法后,众多学者纷纷提出各种所谓“快速算法”,为的是企图突破基-2 算法的局限,或者希望进一步减少算法中的复乘次数。但沸沸扬扬最终回归到原点:还是基-2 算法好。这是因为 DSP 硬件的迅猛发展已经使乘法指令时间与一般指令时间相差无几,从而使那些复杂无比的“新”算

法变得没有实际意义。因此,本书除了正宗的 FFT 基-2 算法,不再涉及其他 FFT 算法。

(3) MATLAB 提供函数 `fft` 和 `ifft` 分别进行傅里叶快速正、反变换。读者只需搞懂 FFT 原理,学会使用函数 `fft` 和 `ifft` 即可。但是,“尺有所短,寸有所长”,MATLAB 至今仍只限于进行仿真(算法研究),不能生成高效代码,供硬件运行。人们在开发与 FFT 有关的产品时,需要使用 C 语言编写 FFT 程序,以便生成高效的执行代码。本书在正文中不讨论程序编写,而在专题中阐述了用 C 语言编写 FFT 程序的方法,并给出文本。

(4) 作者把节省下来的宝贵篇幅用于详细地介绍、演示 MATLAB 在 DSP 课程中的应用。下面只是其中的几个例子。

- 介绍常用而比较灵活的 Goertzel 算法。
- 通过众多的 MATLAB 程序具体地演示各种重要算法(如循环卷积、循环相关、分段卷积、采样率转换等等)的操作,使读者过目不忘。
- 深入地阐述频谱分析技术;演示各种数字滤波器的具体设计方法,使读者据此练出真本领。
- 若干年以前,有人在国外的一本有名的杂志上发表文章,论述著名的 Remez 算法,其中的 C 语言程序竟长达 500 条语句。在 MATLAB 中,用 Remez 算法设计 FIR 数字滤波器时,只需写少数几条语句调用函数 `remez` 即可。但是,函数 `remez` 的滤波机制毕竟有点深奥难懂,本书提供一个揭秘 `remez` 的 MATLAB 程序。从程序的执行过程,可以领悟 `remez` 的滤波机制。

当人们告别计算器和 C 语言而引入 MATLAB 时,各种复杂滤波器(例如多级减采样转换系统)的设计就易如反掌,从而使 DSP 课程变得易教易学,学以致用。应该说,这是生产力的解放。

(5) 本书提供的 MATLAB 程序库配备 214 个具有良好界面的自编 MATLAB 程序,用以阐明 DSP 课程的各种算法,演示各种数字滤波器的设计,这是本书的精华。期望读者充分利用这个平台,通过上机运行程序—思考—修改程序……,练出真本领。为了用好这个函数库,请读者务必阅读“专题 1”,掌握 MATLAB 的基本知识。建议读者把“专题 1”和 MATLAB 程序库结合起来细心阅读,这样既能搞懂 DSP 算法,又能学会 MATLAB 编程技巧(包括动画编程、句柄图形编程、用户图形界面编程等)。“工欲善其事,必先利其器”。MATLAB 功能异常强大。弃而不用,是下策。花一点时间换来高效率,是上上策。其他专题或者帮助读者复习先修课程以便更好地理解本书的一些章节(专题 2、专题 3、专题 4、专题 7、专题 13),或者拓宽读者的视野(专题 5、专题 6、专题 8、专题 9、专题 10、专题 11、专题 12、专题 14、专题 15、专题 16)。

写完本书后,翻开尘封已久的讲稿,两相对比,发现本书的数学推导篇幅大幅度减少,可读性明显增加,而严谨性未减。这只是作者的自我感觉。本书是否真的有助于读者的学习,应该由广大读者评说。

面对日新月异、繁花似锦的 DSP 技术,DSP 教科书理应与时俱进,及时在内容上创新,跟上时代的步伐。本书内容肯定会挂一漏万,各种错误在所难免,期望读者不吝赐正。欢迎广大读者通过电子邮件与作者交流。

最后,送上一句真心话:“实践炼出真知,炼出真本领”。期盼这本书助你成功。

王大伦(dalunwang@126.com)

2014 年 8 月

目录

CONTENTS

第 1 章 走近 DSP	1
1.1 历史回顾	1
1.2 信号及其分类	1
1.2.1 模拟信号和数字信号	2
1.2.2 能量信号和功率信号	3
1.2.3 确定性信号和随机信号	3
1.3 数字信号处理学科概貌	5
1.4 数字信号处理的优势	6
1.5 DSP 系统及其实现	7
1.6 DSP 的应用	8
1.7 DSP 课程学习方法	9
1.8 MATLAB 简介	10
1.9 与本章有关的 MATLAB 函数	11
第 2 章 离散时间信号与系统	12
2.1 时域离散信号——序列	12
2.1.1 定义	12
2.1.2 模拟信号与采样序列的关系	12
2.1.3 常用序列	13
2.1.4 序列的简单运算与变换	17
2.1.5 认识周期序列	19
2.2 用单位采样序列表示任意序列	20
2.3 线性时不变系统	21
2.3.1 系统的定义	21
2.3.2 线性移不变系统	21
2.3.3 单位冲激响应	23
2.4 卷积和	23
2.4.1 定义	23
2.4.2 卷积和的性质	23

2.4.3	卷积和的计算方法	24
2.5	因果稳定系统	28
2.5.1	稳定性	28
2.5.2	因果性	29
2.5.3	卷积运算与实时处理	30
2.6	线性常系数差分方程	31
2.6.1	LTI 系统的数学模型	31
2.6.2	线性常系数差分方程的递推解法	33
2.6.3	应用例子	34
2.7	离散时间信号的相关性	35
2.7.1	互相关序列和自相关序列的定义与计算	35
2.7.2	互相关序列和自相关序列的性质	37
2.7.3	周期序列的相关性	38
2.7.4	应用举例	39
2.8	时域离散系统和信号的频域表示	40
2.8.1	正交变换	40
2.8.2	离散时间傅里叶变换	43
2.8.3	系统的频率响应与冲激响应的关系	46
2.8.4	频率响应的表示方法	47
2.8.5	计算 FT 和 DTFT	48
2.8.6	关于 DTFT 存在的条件	50
2.8.7	系统无失真传输条件	50
2.8.8	时移性质	53
2.8.9	频移性质	53
2.8.10	时域卷积定理	53
2.8.11	频域卷积定理	54
2.9	离散时间傅里叶变换的一些对称性质	54
2.10	采样定理	59
2.10.1	概述	60
2.10.2	时域采样定理	61
2.10.3	抗混叠滤波器	63
2.10.4	对频谱混叠的进一步说明	64
2.11	信号重建	67
2.11.1	理想的信号重建器	67
2.11.2	实际的信号重建器	70
2.12	与本章有关的 MATLAB 函数	71
	练习题	73

第 3 章 变换域中的离散时间系统	79
3.1 z 变换	79
3.1.1 z 变换的定义	79
3.1.2 z 变换与序列傅里叶变换的关系	80
3.1.3 z 变换的收敛域	80
3.2 z 反变换	83
3.2.1 留数法	83
3.2.2 长除法	85
3.2.3 部分分式法	87
3.3 z 变换的性质	92
3.4 系统函数	97
3.4.1 系统函数的定义	97
3.4.2 因果稳定系统对系统函数的要求	98
3.4.3 系统函数与差分方程的关系	98
3.4.4 系统函数的负幂形式和正幂形式	99
3.4.5 频率响应的几何确定法	99
3.4.6 描述离散时间系统的方法	102
3.5 z 变换和拉氏变换的关系	103
3.6 数字陷波器	104
3.7 数字谐振器	105
3.8 梳状滤波器	107
3.9 全通系统	111
3.10 最小相位系统	113
3.10.1 概述	113
3.10.2 非最小相位系统的组成	114
3.11 与本章有关的 MATLAB 函数	116
练习题	116
第 4 章 离散傅里叶变换	121
4.1 引言	121
4.2 周期序列的表示——离散傅里叶级数	122
4.2.1 离散时间傅里叶级数变换	122
4.2.2 旋转因子及其性质	125
4.2.3 周期卷积	125
4.3 离散傅里叶变换	127
4.3.1 定义	127
4.3.2 时域与频域的关系	127
4.3.3 基本信号频谱	128

4.3.4	DFT 和 IDFT 的矩阵表示	130
4.3.5	变换矩阵的滤波作用	131
4.3.6	几种变换的关系	135
4.3.7	对时域采样与频域采样的要求	135
4.4	DFT 的性质	137
4.4.1	周期性	137
4.4.2	线性关系	137
4.4.3	序列的循环移位	137
4.4.4	序列翻转	139
4.4.5	DFT 的对称性	139
4.4.6	循环卷积	141
4.4.7	循环相关	142
4.4.8	Parseval 定理	143
4.5	通过循环卷积实现线性卷积	144
4.6	通过循环相关实现线性相关	145
4.7	基于 DFT 的频谱分析技术	146
4.7.1	概述	146
4.7.2	数据截取——加窗(windowing)	147
4.7.3	矩形窗函数的 DTFT	148
4.7.4	加窗效应	149
4.7.5	非周期截取与频谱泄漏	152
4.7.6	栅栏效应	155
4.7.7	序列补零	155
4.7.8	采样频率的选择	157
4.8	总结——利用 DFT 对非周期连续时间信号傅里叶变换的逼近	159
4.9	Goertzel 算法及其应用	161
4.9.1	Goertzel 算法	161
4.9.2	双音多频(DTMF)信号	163
4.9.3	用 Goertzel 算法实现 DTMF 检测	164
4.10	与本章有关的 MATLAB 函数	165
	练习题	166
第 5 章	快速傅里叶变换	173
5.1	概述	173
5.2	基 2-FFT 的时分算法——第一种形式	174
5.2.1	算法推导	174
5.2.2	算法特点	176
5.3	基 2-FFT 的时分算法——第二种形式	178
5.4	基 2-FFT 的频分算法——第一种形式	179

5.5	基 2-FFT 的频分算法——第二种形式	181
5.6	IDFT 的运算方法	182
5.7	FFT 的软件实现	183
5.7.1	使用 MATLAB 提供的函数	183
5.7.2	用 Visual C++ 6.0 编写 FFT 程序	184
5.8	实序列的 FFT 高效算法	184
5.8.1	高效算法 1——用 N 点复序列计算两个 N 点实序列的 DFT	185
5.8.2	高效算法 2——用 N 点复序列计算 $2N$ 点实序列的 DFT	185
5.9	快速卷积	186
5.10	快速相关	187
5.11	分段卷积	189
5.11.1	概述	189
5.11.2	重叠保留法	189
5.11.3	重叠相加法	191
5.12	Chirp- z 变换	193
5.12.1	概述	193
5.12.2	算法原理	193
5.12.3	计算量	196
5.12.4	应用举例	196
5.13	与本章有关的 MATLAB 函数	198
	练习题	199
第 6 章	无限长冲激响应(IIR)数字滤波器设计	203
6.1	概述	203
6.2	幅度平方函数	206
6.3	冲激响应不变变换法	207
6.4	双线性变换法	211
6.4.1	基本概念	211
6.4.2	变换原理	212
6.5	原型滤波器	214
6.5.1	映射关系	215
6.5.2	原型滤波器的频率指标	218
6.6	巴特沃思模拟滤波器	219
6.7	切比雪夫 I 型模拟滤波器	223
6.8	切比雪夫 II 型模拟滤波器	227
6.9	椭圆模拟滤波器	229
6.9.1	椭圆滤波器的幅度特性	229
6.9.2	归一化模拟椭圆低通滤波器的设计	229
6.9.3	去归一化	231

6.10	从模拟滤波器的转移函数直接导出数字滤波器的系统函数	231
6.11	Z 平面变换法——数字域的频率变换	232
6.12	s 平面变换法——模拟域的频率变换	243
6.13	完全滤波器设计法	245
6.14	与本章有关的 MATLAB 函数	247
6.14.1	概述	247
6.14.2	模拟原型滤波器设计	248
6.14.3	离散化处理	248
6.14.4	滤波器频率特性计算函数	249
6.14.5	数字域频带变换函数	250
6.14.6	完全滤波器设计函数	251
	练习题	253
第 7 章	有限长冲激响应(FIR)数字滤波器设计	256
7.1	概述	256
7.2	线性相位条件	257
7.3	线性相位 FIR 数字滤波器的幅频特性	259
7.4	线性相位 FIR 数字滤波器的零点分布	263
7.5	用窗函数法设计 FIR 滤波器	264
7.5.1	Gibbs 效应	264
7.5.2	窗函数法原理	265
7.5.3	滤波器频率特性分析	267
7.5.4	常用窗函数	270
7.5.5	设计步骤	277
7.5.6	集成函数 fir1	281
7.6	用频率采样法设计 FIR 滤波器	281
7.6.1	原理	281
7.6.2	例子	282
7.6.3	减小逼近误差的措施	284
7.6.4	频率采样点的设置	285
7.6.5	设计步骤	288
7.7	FIR 数字滤波器的最优等波纹设计	289
7.7.1	数值逼近方法简介	289
7.7.2	等波纹逼近原理	291
7.7.3	Herrman-Schuessler 算法	293
7.7.4	Remez 算法	297
7.7.5	Remez 算法应用实例	299
7.8	数字微分器	302
7.9	FIR 滤波器和 IIR 滤波器的比较	305

7.10 与本章有关的 MATLAB 函数	306
练习题	310
第 8 章 数字滤波器的结构	312
8.1 概述	312
8.2 信号流图	313
8.2.1 信号流图的术语及简化规则	313
8.2.2 信号流图的转置	315
8.3 数字系统的软件实现方法	316
8.4 FIR 系统的基本网络结构	320
8.4.1 直接型结构	320
8.4.2 级联型结构	322
8.4.3 频率采样结构	324
8.4.4 快速卷积结构	327
8.5 IIR 系统的基本网络结构	327
8.5.1 直接形式	328
8.5.2 IIR 系统的级联形式	331
8.5.3 IIR 系统的并联形式	333
8.6 滤波器的格型结构	338
8.6.1 全零点格型结构	338
8.6.2 IIR 系统的全极点格型结构	345
8.6.3 IIR 系统的零-极点格型结构	347
8.7 与本章有关的 MATLAB 函数	351
练习题	354
第 9 章 有限字长效应	359
9.1 概述	359
9.2 定点数与浮点数的量化	359
9.2.1 定点制	360
9.2.2 浮点制	360
9.2.3 定点数的定标	361
9.2.4 尾数的表示方法	361
9.2.5 定点数的量化处理	363
9.2.6 浮点数的量化处理	366
9.3 A/D 转换的量化效应	367
9.3.1 采样过程的非线性模型和统计模型	367
9.3.2 量化噪声的频谱	369
9.3.3 量化噪声的方差与 A/D 转换器字长的关系	369
9.4 量化噪声通过线性系统	369