

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

数字信号处理

■ 高新波 阔永红 田春娜 编著



高等教育出版社

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材

数字信号处理

SHUZI XINHAO CHULI

■ 高新波 阎永红 田春娜 编著



高等教育出版社·北京

内容提要

本书是“教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材”。

本书全面、系统地介绍了数字信号处理的基本理论、概念和方法。第0章为绪论,简要介绍了数字信号处理理论与应用的发展与现状;第1章为离散时间信号描述与分析,给出了离散时间信号的序列描述、时域分析以及傅里叶变换;第2章为模拟信号数字化,分析了采样和量化的理论和效应;第3章重点介绍了离散傅里叶变换及其性质,以及快速傅里叶变换的实现方法等;第4章介绍了线性时不变离散时间系统的定义、性质及求解方法等;第5章介绍有限冲激响应滤波器设计方法以及误差分析方法等;第6章主要介绍无限冲激响应滤波器设计方法及其误差分析方法;第7章介绍了数字信号处理的几个典型应用,通过应用加深对数字信号处理理论的理解。以上各部分内容中都提供了 MATLAB 代码,可供学生理论与实践相结合,深化理论学习成果。全书有丰富的例题和习题。书末附有部分习题的参考答案。

本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程、自动化、电子科学与技术、测控技术与仪器、生物医学工程、计算机科学与技术等工科专业以及理科电子信息科学与技术专业的教材,也可作为从事这些专业的工程技术人员和科学研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理 / 高新波, 阔永红, 田春娜编著. --
北京: 高等教育出版社, 2014. 7
ISBN 978 - 7 - 04 - 040170 - 7

I. ①数… II. ①高… ②阔… ③田… 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 126019 号

策划编辑	吴陈滨	责任编辑	吴陈滨	封面设计	赵 阳	版式设计	于 婕
责任校对	殷 然	责任印制	韩 刚				

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400 - 810 - 0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	涿州市京南印刷厂	网上订购	http://www.landaco.com
开 本	787mm × 1092mm 1/16		http://www.landaco.com.cn
印 张	24.5	版 次	2014 年 7 月第 1 版
字 数	600 千字	印 次	2014 年 7 月第 1 次印刷
购书热线	010 - 58581118	定 价	38.10 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 40170 - 00

序

由教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐,西安电子科技大学与高等教育出版社联合策划的这套电子信息类专业基础课程系列教材即将陆续出版发行,我很高兴,这是我国高校电子信息类教材建设工作的一个新举措!

本系列教材的编写基于西安电子科技大学的电子信办办学特色和长期的教学经验积累。学校从1931年诞生于江西瑞金的中央军委无线电学校,到1949年张家口的军委工校和20世纪60年代的“西军电”,80年代的西北电讯工程学院,到现在的西安电子科技大学,一直致力于为国家和军队培养电子信息方面的高级专业人才,是国内最早建立信息论、信息系统工程、雷达、微波天线、电子机械、电子对抗等专业的高校之一,形成了鲜明的电子与信息学科特色与优势。本系列教材由学校众多知名教授担任主编,他们长期从事电子信息专业基础课教学和研究,努力继承和发扬学校在电子信息类专业基础课教学方面的经验和特色,并结合最新的科技进展组织和编写了系列教材。

大家知道,培养高素质的电子信息专门人才的前提,是要加强基础课程建设,尤其是数理基础和专业技术基础,要打造一个高水平的专业基础课程平台;本系列教材正是瞄准这一目标,从电路分析、信号与系统、模电(低频,高频)、数电、电磁场等专业基础课,到通信原理、雷达原理、软件技术基础、微波技术与天线等技术基础课,构成了一个知识面宽阔的电子信息类专业基础课教材体系。

本系列教材在编写时强调了如下几点,也可看做是本系列教材的特色:

(1)本系列教材自成体系,以西安电子科技大学的优势学科和特色专业为依托,覆盖了学校电子信息类专业的主干专业基础课程,知识结构系统完整,内容精练,具有先进性、系统性、完整性等特点。

(2)本系列教材由学校知名教授、专家(包括国家级教学名师、教育部相关教指委委员、学科带头人等)担任主编,他们具有较丰富的教学和科研经验,保证了该系列教材的编写质量。

(3)本系列教材具有很好的基础,大部分教材都是在原有教材的基础上进行修订,在此基础上增加先进的内容和新的方法,而部分原有教材是国家“九五”、“十五”、“十一五”国家级规划教材和普通高等教育精品教材,获得过省部级优秀教材奖。

(4)本系列教材对应的本科生课程大部分是国家级精品课程或省级精品课程,课程建设和教材建设十分注重基础理论知识与实际工程应用之间的紧密结合,注重对学生的分析问题和解决问题能力的培养。

电子信息领域是一个发展异常迅速的领域,新的需求不断产生,新技术不断涌现,电子信息产品迅速更新并广泛应用于社会的各个方面,从而对IT人才培养提出了更高的要求,反映在课程建设和教材建设上,就是要有前瞻性,并不断强化基础、不断适应新技术和新要求,就是要通过

教学改革与创新,不断提高教学质量,进而促进人才培养质量的全面提升。

希望本系列教材能在这方面产生一些积极的促进作用,并在实践中不断改进和提高,为国家培养出更多优秀的电子信息高级专业人才做出贡献!

保铮

2012年5月于西安

序 二

自1999年以来,我国高等教育的规模发生了历史性变化,开始进入大众化的发展阶段。高等院校从生源基础知识水平、课程设置、教学目的到培养目标都趋于多元化,原有教材类型和种类较少的现状已经难以满足不同类型高等院校培养不同类型人才的需求。而在本科教育中,基础课程建设是保证和提高教学质量的关键。为此,“教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会”与高等教育出版社合作,以教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的《电子电气基础课程教学基本要求》、电子信息科学类与电气信息类各教学指导分委员会最新制定的专业规范以及《全国工程教育专业认证标准(试行)》为依据,共同组织制订了“电子信息科学类与电气信息类专业平台课程教材规划”。

这套规划教材的制订和编写遵循了以下几点原则:

1. 尊重历史,将高等教育出版社经过半个多世纪的积淀所形成的名家名作、精品教材纳入规划。这些教材经过数十年的教学实践检验,具有很好的教学适用性。此次规划将依据新的《电子电气基础课程教学基本要求》以及电气信息学科领域的最新发展,对教材内容进行修订。
2. 突出分类指导,突出不同类型院校工程教育的特点。大众化教育阶段,不同类型院校的人才培养目标定位不同,应当根据不同类型院校学生的特点组织编写与之相适应的教材。鼓励有编写基础的一般院校和应用型本科院校经过2~3年的试用,形成适用于本层次教学的教材。
3. 理论知识与实际应用相结合。提倡在教材编写中把理论知识与在实际生产和生活中的应用紧密结合,着重培养学生的工程实践能力和创新能力,以适应社会对工程教育人才的要求。
4. 数字化的多媒体资源与纸质教材内容相结合。在教育部“加快教育信息化进程”的倡导下,提倡利用多样化、立体化的信息技术手段(如动画、视频等),将课程教学内容展现给学习者,以加深他们对知识的理解,达到更好的教学效果。

教材建设是一项长期、艰巨的工程。我们将本着成熟一批出版一批的指导思想,把这项工作扎实持续地推进下去,为电子信息科学类与电气信息类专业基础课程建设一批基础扎实、教学适用性强、体现时代气息的规划教材,为提高高等教育教学质量,深化高等教育教学改革做出应有的贡献。

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员



2010年12月

前 言

数字信号处理从创立以来已经经过了近 60 年的发展,从理论方法到软硬件实现都取得了迅速的发展,而且在很多领域获得了广泛的应用。可以说数字信号处理已经渗透到我们生活的方方面面,也成为电子信息领域本科生和研究生一门重要的专业基础课。

本书参考学时数为 45 学时。学习本课程之前,学生应修过“高等数学”、“线性代数”、“信号与系统”、“微机原理”和“复变函数”等课程。学好这一门课程不仅能为顺利参加信息与通信工程、电子科学与技术以及控制科学与工程等一级学科的专业研究生入学打下良好基础,也能为电子信息技术领域的研究和开发工作创造条件。从历史发展来看,这一课程在欧美等国家起初设置为研究生课程,后来才逐步在本科阶段开设。在我国也经过了大体相同的历程。它所涵盖的知识面较广,而且随着应用的不断发展,“数字信号处理”所包含的内容还在进一步更新,学习这一门课程是有一定难度的。

本书的编写重点放在数字信号处理的基本概念、基本原理和基本算法,力求系统深入地对数字信号处理的基本问题进行阐述,增强学生提出问题、分析问题和解决问题的能力。在教材内容的安排上紧扣从信号到系统、从理论到实践、从经典到新进展的原则。也就是说,在总体的章节安排上,首先介绍离散信号的描述、信号数字化方法以及离散信号的离散傅里叶变换,然后介绍线性时不变系统,进而研究典型的线性时不变系统——滤波器的设计。在每一章的内容安排上,一方面注重科技发展的人文背景介绍,旨在提高学生学习的积极性,另一方面在介绍了基本原理和基本方法之后,又增加最新研究进展的介绍,使学生了解本领域的研究方向和最新研究成果。在每一章的算法和习题安排上,一方面我们在介绍基本算法后又提供了 MATLAB 的实现代码,供学生在运行程序的过程中加深理解;另一方面,在课后习题中我们又提供了一些综合项目,以培养学生利用所学知识完成一个课题的能力,提高学生的综合素质。

本书由西安电子科技大学高新波教授、阔永红教授(第 4~5 章)和田春娜副教授共同编写。张声传、袁博、杨曦、赵林、郑红、陆阳等多名学生先后参与了本书源程序调试以及文字录入、校对工作。西北工业大学段哲民教授仔细审阅了全书,并提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不少缺点和不足之处,敬请广大读者批评指正。作者邮箱为 xbgao@mail.xidian.edu.cn

作者

2014 年 3 月

于西安电子科技大学

目 录

第 0 章 绪论 数字信号处理理论与应用	1
0.1 数字信号处理的发展简史	1
0.1.1 傅里叶变换与快速傅里叶变换	2
0.1.2 数字滤波器	3
0.1.3 数字信号处理器	4
0.1.4 数字信号处理的发展趋势	5
0.2 信号处理的理论基础	6
0.2.1 数学预备知识	7
0.2.2 傅里叶变换	8
0.3 数字信号处理应用技术	9
0.3.1 语音处理	9
0.3.2 图像处理	10
0.3.3 通信	10
0.3.4 雷达	10
0.3.5 声呐	10
0.3.6 音乐处理	10
习题	11
第 1 章 离散时间信号描述与分析	12
1.0 引言	12
1.1 离散时间信号的序列描述	12
1.1.1 常用的典型序列	12
1.1.2 任意序列的表示	16
1.1.3 序列的基本运算	17
1.2 离散时间系统的时域分析	21
1.2.1 线性系统	22
1.2.2 时不变系统	22
1.2.3 系统的单位脉冲响应	22
1.2.4 系统输出与输入之间的关系	23
1.2.5 系统的因果性和稳定性	27

1.3 离散时间信号的傅里叶变换(DTFT)	30
1.3.1 离散时间信号的傅里叶变换的定义	30
1.3.2 离散时间信号傅里叶变换的性质	32
1.3.3 周期信号的离散傅里叶级数	36
1.3.4 周期信号的傅里叶变换	38
1.4 随机离散时间信号的分布	40
1.4.1 时域离散随机信号(随机序列)	40
1.4.2 时域离散随机信号的数字特征	41
1.4.3 平稳随机序列的数字特征及功率谱密度	42
1.4.4 特定的随机序列	45
习题	46
第2章 模拟信号数字化	48
2.0 引言	48
2.1 连续时间信号的采样	48
2.2 奈奎斯特采样定理	51
2.3 常用特殊信号的采样	54
2.3.1 带通信号的采样	54
2.3.2 正弦信号的采样	57
2.3.3 平稳随机信号的采样	59
2.4 信号的量化	60
2.4.1 二进制数的表示	61
2.4.2 量化及量化误差分析	63
2.5 量化效应	68
2.6 最优量化	69
2.7 压缩感知基本原理	70
2.7.1 压缩感知的优势与用途	70
2.7.2 信号的采样与恢复	71
2.7.3 压缩感知的研究趋势	72
习题	73
第3章 离散傅里叶变换	75
3.0 引言	75
3.1 离散傅里叶变换的定义和性质	76
3.1.1 离散傅里叶变换的定义	76
3.1.2 离散傅里叶变换的基本性质	79

3.2 频谱采样	85
3.3 循环卷积	87
3.3.1 两个有限长序列的循环卷积	87
3.3.2 循环卷积定理	89
3.4 快速傅里叶变换	92
3.4.1 直接计算离散傅里叶变换的问题及改进的途径	92
3.4.2 基 2FFT 算法	93
3.4.3 逆离散傅里叶变换的高效算法	106
3.4.4 其他快速算法简介	107
3.5 快速傅里叶变换的计算误差	113
3.5.1 快速傅里叶变换计算误差的产生分析	113
3.5.2 快速傅里叶变换计算连续非周期信号频谱的计算误差	114
3.5.3 快速傅里叶变换计算连续周期信号频谱的计算误差	117
3.5.4 快速傅里叶变换计算有限长序列频谱的计算误差	122
3.6 时频分析与多尺度几何分析	124
3.6.1 时频分析	124
3.6.2 多尺度几何分析	128
习题	134
第 4 章 线性时不变离散时间系统	137
4.0 引言	137
4.1 线性时不变(LTI)系统的性质	137
4.1.1 系统的举例	138
4.1.2 系统的性质	141
4.2 系统的时域描述	144
4.2.1 系统的单位采样响应	144
4.2.2 系统的阶跃响应	146
4.2.3 线性常系数差分方程	147
4.3 系统的复频域的描述	148
4.3.1 系统的传输函数的定义	148
4.3.2 系统的稳定性和因果性分析	149
4.4 系统的频率响应	151
4.4.1 频率响应的定义	151
4.4.2 特征信号	154
4.4.3 幅频响应	155
4.4.4 相位响应	158

4.5	时域离散系统的基本结构	163
4.5.1	基本结构块	163
4.5.2	系统结构的分析	164
4.5.3	系统的基本结构	164
4.6	非线性时变系统初步	173
4.6.1	非线性系统	173
4.6.2	时变线性系统	175
4.6.3	时变非线性系统	176
	习题	177
第5章	有限冲激响应(FIR)滤波器设计	183
5.0	引言	183
5.1	数字滤波器的描述	184
5.1.1	数字滤波器的指标	184
5.1.2	滤波器类型的选择	186
5.1.3	理想滤波器的描述	186
5.2	线性相位 FIR 滤波器	188
5.2.1	零相位滤波器	188
5.2.2	线性相位的条件	190
5.2.3	幅度响应的特点	192
5.2.4	零点分布	193
5.3	窗函数法	194
5.3.1	设计原理	194
5.3.2	吉布斯现象	197
5.3.3	常用的窗函数	201
5.3.4	窗函数法的设计步骤	217
5.3.5	其他类型的 FIR 数字滤波器的设计	219
5.3.6	设计举例	223
5.4	频率采样法	229
5.4.1	设计原理	229
5.4.2	频域采样法的实现	231
5.4.3	性能改进	235
5.4.4	设计举例	237
5.5	迭代设计法	241
5.5.1	概述	241
5.5.2	切比雪夫逼近	243

5.5.3 切比雪夫法的实现	245
5.6 FIR 滤波器误差分析	250
5.7 FIR 滤波器系统的结构	251
5.7.1 线性相位型结构	251
5.7.2 多相结构	252
5.7.3 频率采样结构	253
5.8 自适应滤波器	257
5.8.1 自适应滤波器的原理	257
5.8.2 自适应滤波器的应用	259
5.8.3 自适应滤波器的研究进展	261
习题	262
第 6 章 无限冲激响应 (IIR) 滤波器设计	267
6.0 引言	267
6.1 IIR 滤波器的函数模型设计法	268
6.1.1 模拟滤波器原型	269
6.1.2 模拟滤波器到数字滤波器的转换	283
6.1.3 数字滤波器的频带变换	294
6.2 IIR 数字滤波器的直接设计法	296
6.2.1 零极点累试法	297
6.2.2 均方差最小 IIR 滤波器设计法	297
6.3 IIR 滤波器误差分析	300
6.4 常用的特殊滤波器	300
6.4.1 全通滤波器	301
6.4.2 最小相位滤波器	302
6.4.3 均值滤波器	311
6.4.4 平滑滤波器	312
习题	314
第 7 章 数字信号处理的应用	316
7.0 引言	316
7.1 在源信号产生中的应用	316
7.2 在高速实现中的应用	319
7.2.1 两个有限长序列的线性卷积	319
7.2.2 一个有限长序列和一个无限长序列的线性卷积	320
7.3 在雷达信号处理中的应用	326

7.3.1 线性调频信号(LFM)	327
7.3.2 匹配滤波器	327
7.3.3 脉冲压缩	329
7.3.4 数字脉冲压缩的工程实现方法	330
7.4 在数字语音系统中的应用	331
7.4.1 信号的整数倍抽取	331
7.4.2 信号的整数倍内插	335
7.4.3 整数倍抽取和内插在数字语音系统中的应用	339
习题	344
习题参考答案	345
参考文献	375

第0章 绪论 数字信号处理理论与应用

数字信号处理(Digital Signal Processing)是将信号以数字方式进行表示和处理的理论和技术。其目的在于对真实世界的连续模拟信号进行测量、滤波、变换、增强、压缩、估计或识别。因此,在进行数字信号处理之前,首先需要将信号从模拟域(Analog Domain)转换到数字域(Digital Domain),一般需要通过模数转换器(Analog-to-Digital Conversion, ADC)来实现;而数字信号处理的输出又经常需要变换到模拟域,这是通过数模转换器(Digital-to-Analog Conversion, DAC)来实现的。

数字信号处理的算法需要利用计算机或专用处理设备,如数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)和专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)等。数字信号处理技术及设备具有灵活、精确、抗干扰性强、设备尺寸小、造价低、速度快等突出优点,这些都是模拟信号处理技术与设备所无法比拟的。当然,数字信号处理也有不足之处。目前,数字系统的速度还不能达到处理很高频率信号(例如射频信号)的要求,但随着大规模集成电路、高速数字计算机的发展,尤其是微处理器的发展,数字系统的速度将会越来越高,数字信号处理也会越来越显示出其优越性。

0.1 数字信号处理的发展简史

自数字信号处理学科创建以来,该领域围绕着理论(Theory)、实现(Implementation)及应用(Application)三个方面获得了迅猛的发展。它以众多的学科为理论基础,其成果又渗透到众多的学科中去,成为理论与实践并重、在高新技术领域中占有重要地位的新兴学科。

作为一门新兴的学科,数字信号处理的学科体系是在20世纪40年代至50年代才建立起来的,而真正意义上的数字信号处理的研究却是在20世纪50年代末期至60年代初期才开始的。20世纪60年代中期以后,数字信号处理的理论和技术开始呈现大发展的局面。到了20世纪70年代,数字信号处理已经从单纯依靠移植其他领域的成就来发展自己的状况下摆脱出来,转变为立足于本领域的理论方法和技术成就来求得自身的进步。这就是说,数字信号处理已经发展成为一门不再依赖于模型方法和模拟实验、独立发展的学科。进入20世纪80年代以后,特别是在90年代中期,数字信号处理的理论和技术更加成熟,它开始渗透到各个重要学科领域,并与语音、图像、通信等信息产业紧密结合,不断地在理论上有所突破,在技术上有所创新,开辟着一个又一个新的学科分支。

在20世纪40年代至50年代建立的采样数据系统理论,是数字信号处理理论的前身,因为它还不是真正的数字信号及其处理系统的理论,它只是线性连续系统理论的拓展。20世纪50年代末期至60年代初期,数字计算机被用于信号处理的研究,这才是真正意义上的对数字信号进行处理的研究。数字信号处理技术迅速发展的标志是出现了两项重大研究进展,即快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法的提出和数字滤波器设计方法的完善。

0.1.1 傅里叶变换与快速傅里叶变换

讲到快速傅里叶变换,首先让我们回顾一下傅里叶变换。傅里叶是法国数学家、物理学家,1768年3月21日生于欧塞尔,1830年5月16日卒于巴黎。1807年他向巴黎科学院呈交《热的传播》论文,推导出著名的热传导方程,并在求解该方程时发现解函数可以由三角函数构成的级数形式表示,从而提出任一函数都可以展成三角函数的无穷级数。傅里叶级数(即三角级数)、傅里叶分析等理论均由此创始。从现代数学的眼光来看,傅里叶变换是一种特殊的积分变换。它能够将满足一定条件的某个函数表示成正弦基函数的线性组合或者积分。傅里叶变换属于调和和分析的内容。“分析”,就是条分缕析。通过对函数的条分缕析来达到对复杂函数的深入理解和研究。从哲学上看,分析主义和还原主义就是通过对事物内部适当的分析达到增进对其本质理解的目的。比如近代原子论试图把世界上所有物质的本源分析为原子,而原子不过数百种而已,相对物质世界的无限丰富,这种分析和分类无疑为认识事物的各种性质提供了很好的手段。在数学领域,尽管最初傅里叶分析是作为热过程的解析分析的工具,但是其思想方法仍然具有典型的还原论和分析主义的特征。任意的函数通过一定的分解,都能够表示为正弦函数的线性组合的形式,而正弦函数在物理上是被充分研究而相对简单的函数类,这一想法跟化学上的原子论想法是非常相似的。

尽管傅里叶变换可以用来精细地分析信号,对信号不同组成成分有全面的了解,但是由于其计算复杂,很难实现快速实时的信号分析,从而限制了它的推广应用。随着计算机的出现,人们首先将傅里叶变换推广到离散傅里叶变换,然后开始研究离散傅里叶变换的快速算法。早在1960年,古德(I. J. Good)就提出过用稀疏矩阵变换计算离散傅里叶变换的思想。遗憾的是,由于当时的计算机资源很有限,人们一般都不愿意用宝贵的计算机资源去实践和研究古德算法。1965年,IBM的库利(J. W. Cooley)和普林斯顿大学的图基(J. W. Tukey)提出了著名的快速傅里叶变换(FFT)算法,把按定义计算离散傅里叶变换的速度提高了两个数量级,从而使数字信号处理正式地从理论走向工程实际。快速傅里叶变换算法成为数字信号处理领域中的一项重大突破,也开创了真正意义上的数字信号处理的新时代。快速傅里叶变换不仅是一种快速计算方法,它的出现还有助于启发人们创造新理论和发展新的设计思想。经典的线性系统理论中的许多概念,例如,卷积、相关、系统函数、功率谱等概念,都要在离散傅里叶变换的意义上重新加以定义和解释。

20世纪70年代和80年代,人们还对数字信号处理的其他快速算法进行了广泛和深入的研究,并取得了很多重要成果。例如,人们提出了各种计算卷积和离散傅里叶变换的快速算法,Toeplitz线性方程组的高效解法,以及搜索最佳路径的Viterbi算法等。特别值得一提的是,人们将数论引入数字信号处理,出现了矩形变换、数论变换、多项式变换等许多构思奇特、处理精巧、性能优良的新算法。

随着对傅里叶变换研究的深入,人们逐步认识到傅里叶变换的不足。开始探索新的数字信号处理的分析方法,从而开启了数字信号处理的后傅里叶变换时代。傅里叶变换的局限性主要体现在两个方面:首先,从时间与频率的分辨率上来看,傅里叶变换具有非常好的频率分辨率,但是却丧失了时间分辨率;其次,从对信号的稀疏表示来看,傅里叶变换对于周期信号具有稀疏性,但是对于奇异信号,如冲激信号,则很难进行稀疏表示。

基于前者,人们先后提出了加窗傅里叶变换。通过对待分析的信号进行时间加窗处理,然后再进行傅里叶变换,从而在一定程度上增加了时间分辨率。这就是著名的短时傅里叶变换(Short-Time Fourier Transform, STFT)。当时间窗取不同尺度下的高斯窗时,短时傅里叶变换就变成盖伯(Gabor)变换。盖伯变换可以同时提供时间和尺度信息。为了清楚地描述时变非平稳信号频率随时间变化的关系,人们提出了时频分析,即时频联合域分析(Joint Time-Frequency Analysis, JTFA)。通过设计时间和频率的联合函数, JTFA 可以同时描述信号在不同时间和频率的能量密度或强度。利用时频分布来分析信号,能给出各个时刻的瞬时频率及其幅值,并且能够进行时频滤波和时变信号研究。

为了实现对奇异信号的稀疏表示,人们设计了不同的变换核,即基函数。1986年,著名数学家梅耶(Y. Meyer)偶然构造出一个基信号,并通过不同的时间平移和尺度变换,形成了一组基函数几何。由于这些基信号支撑域小、长度有限,同时具有衰减性和波动性,其振幅呈正负相间的振荡形式,且均值为0,因此人们称这些基信号为“小波”。随后,梅耶与马莱特(S. Mallat)合作建立了构造小波基的统一方法——多尺度分析,小波分析开始蓬勃发展起来,小波变换(Wavelet Transform, WT)成了后傅里叶变换时代调和分析的新的里程碑。比利时女数学家多贝西(I. Daubechies)撰写的《小波十讲》(Ten Lectures on Wavelets)对小波的普及起了重要的推动作用。与傅里叶变换、短时傅里叶变换、盖伯变换相比,小波具有良好的时频局部化特性,因而能有效地从信号中提取资讯,通过伸缩和平移等运算功能对函数或信号进行多尺度细化分析(Multiscale Analysis),解决了傅里叶变换不能解决的许多困难问题,因而小波变换被誉为“数学显微镜”。

尽管小波变换对于点奇异信号具有稀疏性,但是对于线奇异性、曲线奇异性等更为复杂的信号也无法提供稀疏分析的能力。为此,人们又陆续提出了脊波(Ridgelet)、曲波(Curvelet)、轮廓波(Contourlet)、条带波(Bandelet)等一系列的多尺度几何分析(Multiscale Geometric Analysis)方法。这些不同的变换只能针对某种特殊的奇异信号具有稀疏性。为了能够对信号中所包含的所有奇异信号均能实现稀疏表示,人们突破了传统正交变换形式,不再拘泥于完备正交基上的变换形式,而是构造了过完备的变换核,称之为字典,从而实现了任意信号的稀疏表示。目前稀疏表示的研究方兴未艾、如火如荼,我们希望有更好的信号分析方法不断涌现。

0.1.2 数字滤波器

作为数字信号处理学科领域另一项重大突破的数字滤波器,在20世纪60年代中期,就形成了它的完整而正规的理论体系。具体来说,人们提出了各种滤波器结构,有的以运算误差最小为特点,有的以运算速度快见长,而有的则二者兼而有之。人们还提出了数字滤波器的各种设计方法、逼近方法和实现方法,特别是对递归和非递归两类滤波器结构进行了全面比较,统一了数字滤波器的基本概念和理论。在数字信号处理学科的发展过程中,有限冲激响应(Finite Impulse Response, FIR)和无限冲激响应(Infinite Impulse Response, IIR)两类数字滤波器的地位相对地发生过某些变化。起初,人们用窗函数分析数字滤波器,认为IIR滤波器比FIR滤波器的运算效率高。但当提出用快速傅里叶变换算法来实现卷积运算的概念后,人们发现,也可以以很高的运算效率来实现高阶FIR滤波器,这促使人们对高效FIR滤波器的设计方法和数字滤波器的频域设计方法进行了大量研究,从而在其后相当长时期内形成了数字滤波器的时域设计方法与频域

设计方法并驾齐驱的局面。然而,这些均属于数字滤波器的早期研究工作,而且主要是用软件来实现的。

实际上,数字滤波器是一个比上述内容更广泛的概念。除了传统的概念,即根据给定的频率特性指标(低通、带通、高通等)来设计并实现数字滤波器外,人们还深入研究了维纳滤波器和卡尔曼滤波器的数字实现问题,即如何根据信号和噪声的统计特性来设计均方误差最小的最佳线性滤波器。第二次世界大战期间,由于军事技术的需要,根据线性最小均方误差估计准则,维纳提出了一种最优滤波方法,叫维纳滤波器,这种方法在通信、雷达和控制领域获得了广泛的应用。但维纳滤波器不能递推计算,也不适用于非平稳随机信号的滤波问题。由于空间技术应用的推动,1960年,卡尔曼将状态变量概念引入滤波过程,提出了卡尔曼数字滤波器,解决了维纳滤波器存在的两大问题。设计维纳和卡尔曼滤波器,必须对信号和噪声的统计特性有先验知识。自适应数字滤波器的性能几乎与卡尔曼滤波器一样好,而设计时却只需很少或根本不需要任何关于信号与噪声的先验统计知识,因此,自1967年B. 威德罗(Widrow)等人提出以来,在短短的20多年中,发展很快,现已广泛用于系统识别、通信信道的自适应均衡、雷达和声呐的波束形成、噪声中信号的检测、跟踪、增强和线性预测等。

此外,在20世纪70年代发展起来的同态滤波器是用线性系统完成非线性滤波的一个典型,在语音和图像处理中已有成功的应用。20世纪70年代和80年代发展起来的多速率滤波和滤波器组的概念,及其与小波变换之间的密切关系的研究,以及模拟与数字混合滤波器组的研究,其中取得的许多成果,在模数转换和现代通信领域中都获得了重要应用。

0.1.3 数字信号处理器

回顾数字信号处理学科发展的历史,不能不谈到三个著名的实验室——贝尔(Bell)实验室、IBM的沃森(Watson)实验室和MIT的林肯(Lincoln)实验室。这三个实验室从一开始就把数字信号处理作为一项长期持续进行研究的课题。贝尔实验室的凯泽(Kaiser)提出了关于数字滤波器设计的初期思想。IBM的库利和普林斯顿大学的图基提出了著名的FFT算法。而当时由本·戈尔德(Ben Gold)和查理·雷德(Charlie Rader)领导的林肯实验室的开创性工作是把滤波器设计、傅里叶变换算法、语音压缩研究与实时数字信号处理系统的开发等研究工作紧密地结合起来,充分显示出数字信号处理的强大威力。20世纪60年代末,林肯实验室设计并研制成功世界上第一台用于实时信号处理的计算机,称为快速数字处理器(Fast Digital Processor)。在快速数字处理器上能够在 $136\mu\text{s}$ 时间内完成16384点复数离散傅里叶变换。人们利用快速数字处理器开发出了世界上第一台采样频率为10kHz的实时数字同态声码器和第一台多普勒雷达实时信号处理系统。不久,快速数字处理器被新研制成功的林肯数字信号处理器(Lincoln Digital Signal Processor)和林肯数字声音终端(Lincoln Digital Voice Terminal)所取代。林肯数字信号处理器和林肯数字声音终端的体积都要比快速数字处理器的小很多,而其性能却是相同的。林肯数字信号处理器和林肯数字声音终端中的元件虽然都是分立元件,但它们为线性预测声码器的研制做出了不可磨灭的历史贡献,线性预测无论在当时还是在当今都是语音编码的主要方法。快速数字处理器、林肯数字信号处理器和林肯数字声音终端的研制和应用,为开发现代数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)芯片积累了丰富的经验。

20世纪70年代,大规模和超大规模集成电路技术、高速算术运算单元、双极型高密度半导