



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数字信号处理

第二版

吴镇扬



高等教育出版社

数字信号处理

Shuzi Xinhao Chuli

第二版

吴镇扬



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,体现了作者多年的教学和科研经验,基础理论知识与应用背景并重,是一本很实用的教材。

编者在编写本书时注意处理好和“信号与线性系统”课程的关系,在保持课程完整性的同时压缩重复内容。在内容取舍上,结合数字信号处理技术的发展做了精心的安排。全书的具体内容有:绪论、离散时间信号与系统、信号的采样与重建、离散傅里叶变换及其快速算法、无限长单位脉冲响应(IIR)滤波器的设计方法、有限长单位脉冲响应(FIR)滤波器的设计方法、数字信号处理系统的实现、多采样率信号处理。书中很多例题给出了相应的 MATLAB 程序,以便学生能掌握必要的软件工具。实验是本课程的重要环节,相关章节的后面附有实验指导书。

作者主讲的“数字信号处理”课程是首届国家精品课程,课程的网站不断更新,相关教学资源可从 <http://zlgc.seu.edu.cn/jpkc2/ipkc/signal/> 处下载。

本书可供普通高等学校工科电子信息工程、通信工程、自动化、电子科学与技术、测控技术与仪器专业以及理科电子信息科学与技术专业使用。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/吴镇扬主编. —2版. —北京:高等教育出版社,2010.4

ISBN 978-7-04-029075-2

I. ①数… II. ①吴… III. ①数字信号-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(2010)第 030330 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京宏伟双华印刷有限公司

开 本 787×960 1/16
印 张 21.75
字 数 400 000

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2004 年 8 月第 1 版
2010 年 4 月第 2 版
印 次 2010 年 11 月第 2 次印刷
定 价 33.70 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 29075-00

第二版前言

《数字信号处理》教材由高等教育出版社出版,至今已有5年。5年来,作者每年用此教材为本科生讲授该课程,又积累了一定的教学心得。同时,利用“精品课程”网站和各类教学研讨会等各种机会,与同行交流,听到不少关于教材的反馈意见。该教材已列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。上述因素构成了这次修订的推动力。

本次修订与第一版相比有如下改进之处:

1. 新增“第2章 信号的采样与重建”。它不仅将原第1章中的采样定理和原第6章中的抽取与内插的内容归并到这一章,还增加了关于“数字信号处理系统的模拟接口”、“采样与重建中的模拟低通滤波器指标特性”、“连续时间带通信号的采样”以及“信号的采样与重建实验”等内容,这些内容使得数字信号处理更贴近实际应用。

2. 进一步充实了基于MATLAB的编程和实验内容。对相关的MATLAB函数的功能和参数均给出了详细的说明;增加了“用MATLAB设计模拟滤波器”、“用MATLAB设计IIR滤波器”、“用MATLAB设计FIR滤波器”等小节内容。

3. 增加了大量的例题和插图。全书例题增加了近50%,插图增加了近40%,这样做,更便于学生阅读和自学。

4. 在文字描述方面做了部分修改,对原有的一些不够精确的插图重新绘制。

5. 纠正了原书中的错漏之处。对原有的例题一一核对,纠正了一些细小的不引人注意的错误,一些数学推导添加了中间的过程。

在出版教材的同时对课程网站的内容进行更新,超星数字图书馆正协助拍摄课程录像,即将在互联网上发布。

第二版教材的参考学时数依然是48学时,包含课内实验6学时。建议授课学时安排:绪论1学时,第1章4学时,第2章5学时,第3章9学时,第4章6学时,第5章6学时,第6章9学时,第7章及一些标有“*”的章节,可根据专业方向与专业特色选择部分内容给学生讲授,选择的内容大约需2学时。

作者在编写本书的过程中,得到了东南大学“数字信号处理”课程组的毛卫宁教授、方世良教授、衡伟教授以及张萌副教授的热情协助,几位研究生杨志鸿、陈亮、尤红岩、张超鹏和周菲菲等协助做了许多工作,在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中难免还存在一些错误和不足之处,恳请读者批评指正。

作者的电子邮件地址是:zhenyang@seu.edu.cn。

作者

2009年10月于东南大学

第一版前言

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,适宜作为电气信息(含电子信息工程、通信工程、电子信息科学与技术、电子科学与技术和自动化)专业以及仪器仪表类专业的本科生教材。学生在使用本教材之前应具有信号与线性系统的基础知识。

近年来由于计算机技术的发展,“数字信号处理”这门课程越来越受到有关专业师生的重视,数字信号处理技术本身在设计思想、算法、仿真与设计工具以及硬件结构等方面也在不断更新发展;与此同时,与之相关的一些课程体系也发生了较大的变化,课程间的整合与衔接有必要认真加以考虑。以下是编写这本教材的指导思想和具体做法:

1. “信号与线性系统”是“数字信号处理”的先修课程,目前的趋势是“信号与线性系统”课程中离散信号与系统的比重大大增加。“数字信号处理”课程既应避免与“信号与线性系统”课程内容的大量重复,又应保持课程的完整性。我们的做法是尽量压缩与“信号与线性系统”课程重复的内容,在简要地复习离散时间信号与系统理论的同时密切联系数字信号处理中的一些具体问题展开讨论。这些问题包括离散时间信号与数字信号的差异;采样频率应如何选取;离散系统在计算机中是如何实现的;在数字信号处理的过程中系统的因果稳定性还会受到哪些因素的影响等。

2. “数字信号处理”是一门介于专业基础和专业之间的课程,教学中既应强调其基础理论知识又应强调其应用背景,两者应当比较好地结合起来,特别是介绍新技术时,应当侧重于它的原理分析,不能变成文本或标准的缩写。例如,数字信号处理器的发展和数字信号处理技术密切相关,在教材中将介绍这类器件的重点放在其结构特点与数字信号处理算法之间的关系上,而避免花很多的篇幅去介绍其指令系统甚至是时序逻辑,所举的一些例子也和数字信号处理算法密切相关;在多采样率信号处理一章中,介绍了 A/D 和 D/A 转换器的过采样技术,这一重要的技术涉及许多信号处理的理论和概念,在以往的“数字电路”课程中无法向学生讲授。

3. 我们体会到学生在学习这门课程时还应掌握一些必要的软件工具,这既有利于加强概念的理解,又是今后进一步学习和研究所不可缺少的。教材引入了国际上流行的用于科学计算的 MATLAB 语言,不少例题均给出了相应的

MATLAB 程序,它们既说明了用 MATLAB 解决信号处理问题的强大功能,又便于学生验证书中的例题和进一步利用 MATLAB 去完成书中的实验和习题。

4. 上机实验是学习“数字信号处理”不可缺少的环节,故我们将实验指导书附在相关章节的后面。考虑到一些学生在学习这门课程以前尚未使用过 MATLAB 软件,书中以附录的形式简单地介绍了 MATLAB 的使用方法,相信学生通过阅读附录和书中的实例很容易掌握 MATLAB 软件。

5. 在内容的取舍方面,本书结合数字信号处理技术的发展做了精心的安排。例如,在离散傅里叶变换及其快速算法方面,讨论了利用 DFT 做连续信号的频谱分析和用 FFT 计算相关函数的有关问题;在滤波器设计方面,由于设计手段的更新,以往依赖于设计手册的方法已毫无意义,故在复习模拟滤波器时侧重于介绍其特点、性能和参数的意义,讨论数字滤波器设计时也加强了如何用计算机设计数字滤波器的有关内容;在有限字长效应方面,本书侧重于定点的舍入运算误差分析,浮点运算的精度高,很少有必要去做有限字长效应的分析,而硬件的发展已较少使用定点截尾处理;对于滤波器系数量化效应的统计分析方法几乎已经没有实用价值,而 MATLAB 仿真却可以准确地计算出系数量化对频率响应的影响,因而本书舍弃了统计分析方法代之以 MATLAB 仿真;多采样率信号处理在通信等信息处理系统中已得到广泛的应用,目前国外的数字信号处理教材大部分介绍多采样率信号处理,尽管多采样率信号处理系统属于时变系统,但其设计分析方法和经典的数字信号处理内容有很大的关联性,我们认为这部分内容放在这门课程中比较合适;而对于现代谱估计、最优滤波以及自适应信号处理等可以作为“随机信号处理”或“现代信号处理”课程的内容,属于大学本科的选修课内容。

本课程的教学参考学时约 48 学时,包含课内实验 6 学时。建议授课学时安排:绪论 1 学时,第 1 章 5 学时,第 2 章 9 学时,第 3 章 6 学时,第 4 章 6 学时,第 5 章 9 学时,第 6 章 6 学时。书中一些标有“*”的章节,其内容或是为了补充学生知识的不足,或是为了拓宽学生的知识面,教师可根据情况做出选择。

在编写这本教材的同时,作者所主讲的相应课程已被评为国家精品课程,相关教学参考资料见 <http://jwc.seu.edu.cn/zq/signal/default.asp>。

作者在编写本书的过程中,得到了共同从事这门课程教学的毛卫宁教授和方世良教授的热情协助,几位研究生彭岳星、刘海滨、李婴等也协助做了许多工作,在此表示诚挚的谢意。

特别要感谢北京邮电大学赵尔沅教授,他审阅了全部书稿,提出了宝贵的意见。

由于作者水平所限,书中难免还存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。作者的电子邮件地址是:zhenyang@seu.edu.cn。

吴镇扬

2004. 7

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》,其行为人将承担相应的民事责任和行政责任,构成犯罪的,将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序,保护读者的合法权益,避免读者误用盗版书造成不良后果,我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人给予严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为,希望及时举报,本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话:(010)58581897/58581896/58581879

反盗版举报传真:(010)82086060

E-mail: dd@hep.com.cn

通信地址:北京市西城区德外大街4号

高等教育出版社打击盗版办公室

邮编:100120

购书请拨打电话:(010)58581118

策划编辑	吴陈滨
责任编辑	曲文利
封面设计	赵阳
责任绘图	尹莉
版式设计	范晓红
责任校对	金辉
责任印制	毛斯璐

目 录

绪论	1
第 1 章 离散时间信号与系统	7
1.1 离散时间信号	7
1.1.1 几种最常用的典型序列	8
1.1.2 离散周期序列	9
1.1.3 序列的运算	10
1.2 离散时间信号的傅里叶变换与 z 变换	12
1.2.1 离散时间信号的傅里叶变换	12
1.2.2 z 变换	14
1.2.3 逆 z 变换	17
1.2.4 z 变换的性质	18
1.2.5 z 变换与 DTFT 的关系	19
1.2.6 Parseval 定理	19
1.3 离散时间系统	20
1.3.1 线性系统	21
1.3.2 时不变系统	21
1.3.3 线性时不变系统	22
1.3.4 系统的稳定性与因果性	24
1.3.5 系统的差分方程描述	25
1.4 系统的频率响应及其系统函数	28
1.4.1 系统的频率响应	28
1.4.2 系统函数	28
1.4.3 系统函数与差分方程的关系	29
1.4.4 系统函数的零点与极点	29
1.4.5 FIR 系统和 IIR 系统	32
习题	33
实验一 熟悉 MATLAB 环境	36
附录 MATLAB 简介	38
第 2 章 信号的采样与重建	46
2.1 数字信号处理系统的模拟接口	46
2.2 模拟信号的采样与重建	48

* 2.3 采样与重建中的模拟低通滤波器指标特性	55
2.3.1 滤波器的幅频特性	55
2.3.2 抗混叠滤波器的指标特性	56
2.3.3 平滑滤波器的指标特性	57
* 2.4 连续时间带通信号的采样	58
2.5 离散时间信号的采样与插值	60
2.5.1 离散信号的采样——整数 M 倍抽取 (Decimation)	60
2.5.2 离散信号的插值——整数 L 倍内插 (Interpolation)	68
2.5.3 抽取与插值相结合——采样率按 L/M 改变	75
习题	75
实验二 信号的采样与重建	77
第 3 章 离散傅里叶变换及其快速算法	80
3.1 离散傅里叶变换	80
3.1.1 离散傅里叶级数	80
3.1.2 离散傅里叶变换	84
3.2 利用 DFT 进行连续信号的频谱分析	97
3.2.1 连续非周期信号的频谱分析	97
3.2.2 连续周期信号的频谱分析	103
3.3 快速傅里叶变换	105
3.3.1 按时间抽取的 FFT	106
3.3.2 按频率抽取的 FFT	111
3.3.3 N 为组合数的 FFT 和基四 FFT	115
3.3.4 Chirp- z 变换	119
3.4 关于 FFT 应用中的几个问题	123
3.4.1 用 FFT 计算 IDFT	123
3.4.2 实数序列的 FFT	124
3.4.3 线性卷积的 FFT 算法	125
3.4.4 用 FFT 计算相关函数	130
3.4.5 用 FFT 计算二维离散傅里叶变换	133
习题	134
实验三 快速傅里叶变换及其应用	138
第 4 章 无限长单位脉冲响应 (IIR) 滤波器的设计方法	141
4.1 滤波器的基本原理	141
4.1.1 滤波器的分类	142
4.1.2 可实现滤波器的特性	143
* 4.2 模拟滤波器设计方法	143
4.2.1 巴特沃思 (Butterworth) 滤波器	145

4.2.2	切比雪夫(Chebyshev)滤波器	146
4.2.3	椭圆(Elliptic)滤波器	148
4.2.4	模拟高通、带通及带阻滤波器的设计	150
4.2.5	用 MATLAB 设计模拟滤波器	151
4.3	根据模拟滤波器设计 IIR 滤波器	155
4.3.1	脉冲响应不变法	155
4.3.2	双线性变换法	159
4.3.3	用 MATLAB 设计 IIR 滤波器	161
4.4	从模拟滤波器低通原型到各种数字滤波器的频率变换	166
4.4.1	低通变换	166
4.4.2	高通变换	169
4.4.3	带通变换	171
4.4.4	带阻变换	174
4.5	从低通数字滤波器到各种数字滤波器的频率变换	175
4.5.1	数字低通-数字低通	176
4.5.2	数字低通-数字高通	177
4.5.3	数字低通-数字带通	178
4.5.4	数字低通-数字带阻	178
*4.6	IIR 数字滤波器的最优化设计方法	179
4.6.1	帕德(Pade)逼近法	179
4.6.2	普罗尼(Prony)算法	181
	习题	183
	实验四 IIR 数字滤波器的设计	185
第 5 章	有限长单位脉冲响应滤波器的设计方法	187
5.1	线性相位 FIR 滤波器的特点	187
5.1.1	线性相位的条件	187
5.1.2	幅度特性	189
5.1.3	零点特性	194
5.2	窗口设计法	196
5.2.1	窗口函数对幅频特性的影响	196
5.2.2	几种常用的窗口函数	201
5.2.3	用 MATLAB 实现窗口设计法	208
5.3	频率采样设计法	211
5.4	FIR 滤波器的最优化设计	218
5.4.1	非线性最优法	219
5.4.2	插值解法	221
5.4.3	雷米兹(Remez)交替算法	222

5.4.4 用 MATLAB 实现雷米兹交替算法	224
5.5 IIR 与 FIR 数字滤波器的比较	227
习题	228
实验五 FIR 数字滤波器的设计	230
第 6 章 数字信号处理系统的实现	232
6.1 数字滤波器的结构	233
6.1.1 数字网络的信号流图	233
6.1.2 IIR 滤波器的结构	235
6.1.3 FIR 滤波器的结构	240
6.2 量化与量化误差	246
6.2.1 二进制数的表示	246
6.2.2 定点制的量化误差	248
6.2.3 A/D 转换的量化效应	250
6.2.4 量化噪声通过线性系统	252
6.3 有限字长运算对数字信号处理系统的影响	254
6.3.1 IIR 滤波器的有限字长效应	254
6.3.2 FIR 滤波器的有限字长效应	258
6.3.3 FFT 计算中的有限字长效应	259
6.4 极限环振荡	264
6.4.1 零输入极限环振荡	264
6.4.2 大信号极限环振荡	267
6.5 系数量化对数字滤波器的影响	269
6.5.1 极点位置灵敏度	270
6.5.2 利用 MATLAB 分析系数量化对数字滤波器性能的影响	273
6.6 数字信号处理硬件	275
6.6.1 数字信号处理器的发展概况	275
6.6.2 DSP 的特点	277
6.6.3 TMS320 系列数字信号处理器	278
6.6.4 TMS320C5000 的结构原理	280
6.6.5 TMS320C54 的指令系统	284
6.6.6 TMS320C54x 系列 DSP 的开发环境	286
习题	289
* 第 7 章 多采样率信号处理	294
7.1 抽取滤波器与内插滤波器	294
7.1.1 抽取滤波器	294
7.1.2 内插滤波器	298
7.1.3 抽取滤波器的 FIR 结构	300

7.1.4 内插滤波器的 FIR 结构	301
7.2 过采样 (Oversampling) 技术	302
7.2.1 过采样 A/D 转换器和 D/A 转换器	302
7.2.2 噪声整形技术	303
7.3 正交镜像滤波器组 (Quadrature Mirror Filter, QMF)	307
7.3.1 数字滤波器组的一般概念和定义	307
7.3.2 正交镜像滤波器组	307
7.3.3 QMF 公共低通滤波器的 FIR 设计	310
7.4 树状结构滤波器组	313
7.4.1 倍频程分隔的分析滤波器组	313
7.4.2 倍频程分隔的综合滤波器组	314
7.5 离散小波 (Wavelet) 变换	315
7.5.1 连续小波变换	316
7.5.2 多分辨率分析	316
7.5.3 二进小波	317
7.5.4 二进小波变换与滤波器组	318
习题	322
部分习题答案	324
参考文献	332

绪 论

数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)技术真正得到应用迄今还不到半个世纪,但是,它却从根本上改变了信息产业的面貌。20 世纪末,由于超大规模集成电路的出现,数字信号处理在理论和应用方面有了惊人的发展,在越来越多的应用领域中迅速替代传统的模拟信号处理方法,并且不断开辟出许多新的应用领域。例如,1877 年由爱迪生发明的以唱片为基础的留声机及其以后发展起来的电唱机,它们经历了一个多世纪的历程。1982 年问世的 CD 唱盘,是数字技术取代模拟技术的典型产品。CD 唱盘只用了 5 年的时间就彻底淘汰了唱片。今天,数字信号处理系统随处可见,人们每天都会接触到各种数字信号处理系统,从 MP3 播放器、手持电话、医疗影像设备到高清电视、数码照相机等。数字信号处理已不再是一个陌生的名词,每一个迈入电子信息领域的大学生或工程技术人员都急切地希望对数字信号处理有更多的了解。

1. 信号的分类和特征

在讨论数字信号处理之前,首先讨论关于信号的定义。信号在人们的日常生活中扮演着重要的角色,人们经常遇到的信号有语音、音乐、图像以及其他视频信号等。一般来说,信号是独立变量的函数,这个变量可以是时间、空间位置等。例如语音和音乐信号反映了空间某一位置上空气压力随时间的变化,它们属于一维信号;黑白图像反映了光的亮度随二维空间位置的变化,属于二维信号;而视频信号是空间位置和时间 3 个变量的函数,属于三维信号。通常,以自然方式产生的信号的独立变量是连续的,这类信号称为**连续信号**(Continuous signal)。

信号可以由单个信号源产生,也可以由多个信号源产生。前者是一**标量信号**(Scalar signal),而后者是一**向量信号**通常也称为**多通道信号**(Multichannel signal),例如,立体声信号是一种双通道信号。

对于一维连续信号,如果独立变量为时间,称为**连续时间信号**(Continuous time signal),可表示为 $x(t)$,其中 t 表示时间。对于特定的独立变量所对应的信号值 x 称为幅值。连续时间信号的幅值可以是连续的也可以是不连续的(离散的),而通常所说的**模拟信号**(Analog signal),不仅在时间上是连续的,在幅值上也是连续的,模拟信号是连续信号的特例。

如果变量 t 的取值为一组特定的数,则称为 t 的量化值。如取一组数为整数

集合,则 t 的取值只能为整数,也就是说, t 被量化为最近的整数。考虑 t 的量化形式为

$$t = nT$$

式中, n 为整数; T 为一常量。此时, t 的取值为 $\cdots, -2T, -T, 0, T, 2T, \cdots$ 。连续时间变量 t 的量化步长为 T 。若量化步长是常数,则称为均匀量化。实际应用中的量化步长未必都是均匀的,但均匀量化较为常用。离散时间信号 (Discrete time signal) 的时间变量是量化值,即

$$x(nT) = x(t) |_{t=nT}$$

当离散时间信号的幅值也为量化值时,就称此信号为**数字信号** (Digital signal)。大多数数字信号都采用二进制编码,事实上当采用二进制数对幅值编码时也就进行了量化处理。数字信号可以用有限的存储器空间和有限的二进制数位存储,更便于计算机处理。对数字信号做加工或处理的核心部件是通用或专用的计算机(或处理器)。

根据信号的特征又可分为**确定信号** (Deterministic signal) 和**随机信号** (Random signal)。确定信号可以用数学函数加以描述,如果函数的所有参数已知,则每一时刻的信号值都是确定的。而随机信号任意时刻的值则不能确定,随机信号在工程领域中十分普遍,如语音信号、雷达信号、视频信号、生物医学信号和各种噪声信号等,研究随机信号,人们更加关注它的统计量。

2. 为什么要采用数字信号处理

数字信号处理采用通用或专用的计算机等数字系统完成信号处理的任务,它具有数字系统的一些共同优点,例如抗干扰、可靠性强,便于大规模集成等。除此之外,与传统的模拟信号处理方法相比较,它还具有以下一些明显的优点:

(1) 精度高。例如,在模拟系统的电路中,元器件精度要达到 10^3 以上已经不容易了,而数字系统 17 位字长可以达到 10^5 的精度。又如,基于离散傅里叶变换的数字式频谱分析仪,其幅值精度和频率分辨率均远远高于模拟频谱分析仪。

(2) 灵活性强。数字信号处理采用了专用或通用的数字系统,其性能取决于运算程序和乘法器的各系数,这些均存储在数字系统中,只要改变运算程序或系数,即可改变系统的特性参数,比改变模拟系统方便得多。

(3) 可以实现模拟系统很难达到的指标或特性。例如,数字信号处理中的有限长单位脉冲响应数字滤波器可以实现严格的线性相位;在数字信号处理中可以将信号存储起来,用延迟的方法实现非因果系统,从而提高了系统的性能指标;数据压缩方法可以大大减少信息传输所需的信道容量。

(4) 可以实现多维信号处理。利用庞大的存储单元,可以存储二维的图像信号或多维的阵列信号,实现二维或多维的滤波及频谱分析等。

当然数字信号处理系统也存在着一定的缺点,主要表现在:

(1) 增加了系统的复杂性。它需要模拟接口,包括 A/D 转换器、D/A 转换器、模拟滤波器等,以及比较复杂的数字系统。

(2) 应用的频率范围受到限制。主要是 A/D 转换的采样频率的限制,在教材中将讨论 A/D 转换采样频率和被处理信号的上限频率之间的关系。

(3) 系统的功率消耗比较大。数字信号处理系统中集成了几十万甚至更多的晶体管,而模拟信号处理系统中大量使用的是电阻、电容、电感等无源器件,随着系统的复杂性增加功率消耗将比较大。

3. 数字信号处理的发展与应用

数字信号处理技术正不断地克服上述缺点,以惊人的速度发展。一方面,超大规模集成电路使得数字部件成本降低、尺寸缩小、计算速度加快,推动了数字信号处理的应用;另一方面,数字信号处理在理论和方法上均向更深的层次发展,这使得数字信号处理的应用领域不断扩大。数字信号处理的发展表现为:

(1) 由简单的运算走向复杂的运算。目前几十位乘几十位的全并行乘法器可以在几纳秒的时间内完成一次浮点乘法运算,在运算速度和运算精度上均为复杂的数字信号处理算法的使用提供了先决条件。

(2) 由低频走向高频。A/D 转换器的采样频率已高达数百兆赫,可以将视频甚至更高频率的信号数字化后送入计算机处理。

(3) 由一维走向多维。随着计算机存储能力的增加,像高分辨率彩色电视、雷达、石油勘探等多维信号处理的应用领域已与数字信号处理结下了不解之缘。

1965 年 J. W. Cooley 和 J. W. Tukey 提出了快速傅里叶变换算法,人们开始注意到数字信号处理技术的实用性,但是当时计算机的运算能力仅限于每秒数百万条指令的水平,使用快速傅里叶变换算法每秒仅能处理几千个数据,即使对于音频信号也满足不了实时处理的要求。况且当时的计算机的价格高昂,更不可能应用于一般的信号处理。1978 年 A. V. Oppenheim 在他主编的《数字信号处理的应用》(Application of Digital Signal Processing, Prentice-Hall, 1978) 一书中,列举了数字信号处理在通信、音响、语音、图像、雷达、声呐和地球物理七个方面的应用实例。在短短的 20 多年时间里,这些系统已几经更新换代,发展极其迅速。例如,在图像处理方面,图像数据压缩是多媒体通信、影碟机(VCD 或 DVD)和高清晰度电视(HDTV)的关键技术,国际上先后制定的标准有 H. 261、H. 263、H. 264、JPEG、MPEG-1、MPEG-2 和 MPEG-4,这些标准中均使用了离散余弦变换(DCT)算法。近几年来发展起来的小波(Wavelet)变换也是一种具有高压缩比和快速运算特点的崭新压缩技术,应用前景十分广阔,已用于新一代压缩技术的标准。此外,数字信号处理不断开辟新的应用领域,例如,在机械制造中,基于快速傅里叶变换(FFT)算法的频谱分析仪用于振动分析和机械故障诊