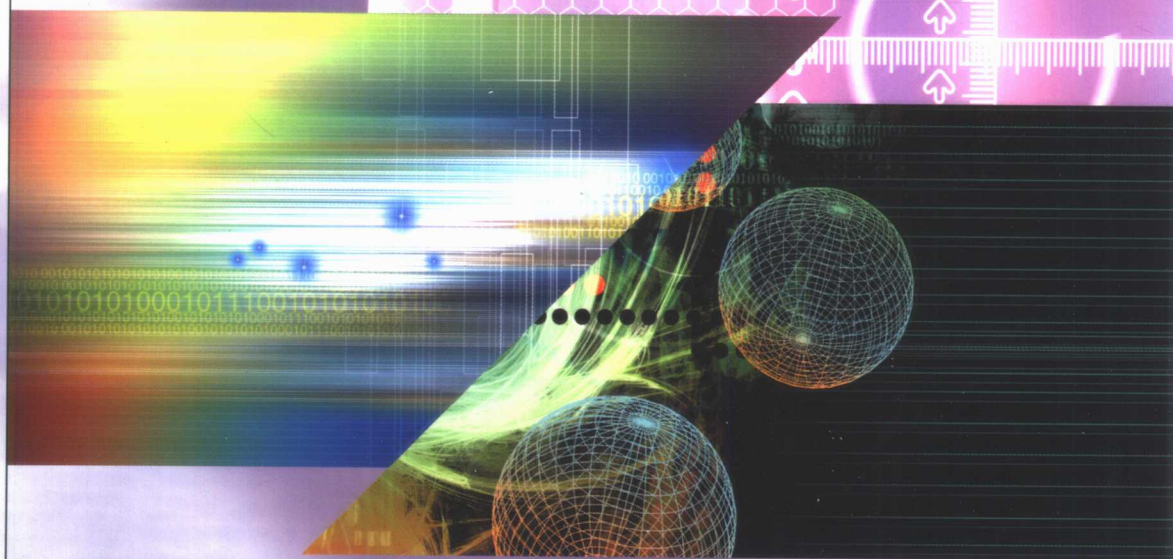




普通高等教育“十五”国家级规划教材

数字信号处理

吴镇扬



高等教育出版社

内容提要

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材,由东南大学吴镇扬教授编写。东南大学的“数字信号处理”课程是首届国家精品课程,本书体现了作者多年的教学和科研经验。本书基础理论知识与应用背景并重,是一本很实用的教材。

作者在编写本书时注意处理好和“信号与线性系统”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、离散傅里叶变换及其快速算法、无限长单位脉冲响应滤波器的设计方法、有限长单位脉冲响应滤波器的设计方法、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,为此将实验指导书附在相关章节的后面。

为便于师生使用本书,即将推出与本书配套的教学指导书,同时,作者所在学校将完善本门课程网站,发布和更新教学资源。

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. —北京:高等教育出版社, 2004.9

ISBN 7-04-015482-X

I. 数… II. 吴… III. 数字信号—信号处理—高等学校—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 074723 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 100011
总 机 010-58581000

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京印刷集团有限责任公司印刷二厂

开 本 787×960 1/16
印 张 17.75
字 数 320 000

版 次 2004 年 9 月第 1 版
印 次 2004 年 9 月第 1 次印刷
定 价 22.40 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:15482-00

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到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,我们将同时建设好该课程的网站,发布和更新相关的教学参考教材。

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

目 录

绪论	(1)
第 1 章 离散时间信号与系统	(8)
1.1 离散时间信号	(8)
1.1.1 几种常用的典型序列	(8)
1.1.2 序列的运算	(9)
1.2 采样	(11)
1.3 离散时间信号的傅里叶变换(DTFT)与 z 变换	(16)
1.3.1 离散时间信号的傅里叶变换(DTFT)	(16)
1.3.2 z 变换	(18)
1.3.3 逆 z 变换	(20)
1.3.4 z 变换的性质	(21)
1.3.5 z 变换与 DTFT 的关系	(22)
1.3.6 Parseval 定理	(22)
1.4 离散时间系统	(23)
1.4.1 线性系统	(23)
1.4.2 时不变系统	(24)
1.4.3 线性时不变系统	(24)
1.4.4 系统的稳定性与因果性	(26)
1.4.5 系统的差分方程描述	(27)
1.5 系统的频率响应与系统函数	(30)
习题	(35)
实验一 熟悉 MATLAB 环境	(38)
附录 MATLAB 简介	(39)
第 2 章 离散傅里叶变换及其快速算法	(45)
2.1 离散傅里叶变换(DFT)	(45)
2.1.1 离散傅里叶级数(DFS)	(45)
2.1.2 离散傅里叶变换(DFT)	(49)
2.2 利用 DFT 做连续信号的频谱分析	(60)
2.3 快速傅里叶变换(FFT)	(64)

2.3.1	按时间抽取的 FFT	(65)
2.3.2	按频率抽取的 FFT	(71)
2.3.3	N 为组合数的 FFT 和基四 FFT	(74)
2.3.4	Chirp- z 变换	(79)
2.4	关于 FFT 应用中的几个问题	(82)
2.4.1	用 FFT 计算 IDFT	(82)
2.4.2	实数序列的 FFT	(83)
2.4.3	线性卷积的 FFT 算法	(84)
2.4.4	用 FFT 计算相关函数	(89)
2.4.5	用 FFT 计算二维离散傅里叶变换	(91)
	习题	(92)
	实验二 快速傅里叶变换(FFT)及其应用	(96)
第3章	无限长单位脉冲响应(IIR)滤波器的设计方法	(99)
3.1	根据模拟滤波器设计 IIR 滤波器	(100)
3.1.1	脉冲响应不变法	(101)
3.1.2	双线性变换法	(105)
* 3.2	常用模拟低通滤波器特性	(107)
3.2.1	巴特沃思(Butterworth)滤波器	(109)
3.2.2	切比雪夫(Chebyshev)滤波器	(110)
3.2.3	椭圆(Elliptic)滤波器	(112)
3.3	从模拟滤波器低通原型到各种数字滤波器的频率变换	(114)
3.3.1	低通变换	(114)
3.3.2	高通变换	(117)
3.3.3	带通变换	(119)
3.3.4	带阻变换	(123)
3.4	从低通数字滤波器到各种数字滤波器的频率变换	(124)
3.4.1	数字低通—数字低通	(125)
3.4.2	数字低通—数字高通	(126)
3.4.3	数字低通—数字带通	(127)
3.4.4	数字低通—数字带阻	(128)
* 3.5	IIR 数字滤波器的最优化设计方法	(128)
3.5.1	帕德(Pade)逼近法	(129)
3.5.2	普罗尼(Prony)算法	(129)
	习题	(130)
	实验三 IIR 数字滤波器的设计	(132)

第4章 有限长单位脉冲响应(FIR)滤波器的设计方法	(134)
4.1 线性相位 FIR 滤波器的特点	(134)
4.1.1 线性相位的条件	(134)
4.1.2 幅度特性	(136)
4.1.3 零点特性	(140)
4.2 窗口设计法	(143)
4.3 频率采样设计法	(155)
4.4 FIR 滤波器的最优化设计	(160)
4.4.1 非线性最优法	(160)
4.4.2 插值解法	(163)
4.4.3 雷米兹(Remez)交替算法	(163)
4.5 IIR 与 FIR 数字滤波器的比较	(167)
习题	(168)
实验四 FIR 数字滤波器的设计	(170)
第5章 数字信号处理系统的实现	(173)
5.1 数字滤波器的结构	(174)
5.1.1 数字网络的信号流图	(174)
5.1.2 IIR 滤波器的结构	(176)
5.1.3 FIR 滤波器的结构	(180)
5.2 量化与量化误差	(187)
5.2.1 二进制数的表示	(187)
5.2.2 定点制的量化误差	(189)
5.2.3 A/D 转换的量化效应	(191)
5.2.4 量化噪声通过线性系统	(193)
5.3 有限字长运算对数字信号处理系统的影响	(195)
5.3.1 IIR 滤波器的有限字长效应	(196)
5.3.2 FIR 滤波器的有限字长效应	(199)
5.3.3 FFT 计算中的有限字长效应	(201)
5.4 极限环振荡	(205)
5.4.1 零输入极限环振荡	(205)
5.4.2 大信号极限环振荡	(208)
5.5 系数量化对数字滤波器的影响	(211)
5.5.1 极点位置灵敏度	(211)
5.5.2 利用 MATLAB 分析系数量化对数字滤波器性能的影响	(214)
5.6 数字信号处理硬件	(217)

5.6.1 数字信号处理器的发展概况	(217)
5.6.2 DSP 的特点	(218)
5.6.3 TMS320 系列数字信号处理器	(220)
5.6.4 TMS320C5000 的结构原理	(222)
5.6.5 TMS320C54 的指令系统	(226)
5.6.6 TMS320C54x 系列 DSP 的开发环境	(228)
习题	(232)
第 6 章 多采样率信号处理	(237)
6.1 采样率降低——整数 M 倍抽取	(237)
6.2 采样率提高——整数 L 倍内插	(240)
6.3 抽取与内插的 FIR 结构	(243)
6.3.1 抽取的 FIR 结构	(244)
6.3.2 内插的 FIR 结构	(245)
6.4 过采样(Oversampling)技术	(246)
6.4.1 过采样 A/D 转换器和 D/A 转换器	(246)
6.4.2 噪声整形技术	(248)
6.5 正交镜像滤波器组(Quadrature Mirror Filter, QMF)	(251)
6.5.1 数字滤波器组的一般概念和定义	(251)
6.5.2 正交镜像滤波器组	(252)
6.5.3 QMF 公共低通滤波器的 FIR 设计	(255)
6.6 树状结构滤波器组	(258)
6.6.1 倍频程分隔的分析滤波器组	(258)
6.6.2 倍频程分隔的综合滤波器组	(259)
* 6.7 离散小波(Wavelet)变换	(260)
6.7.1 连续小波变换	(260)
6.7.2 多分辨率分析	(261)
6.7.3 二进小波	(262)
6.7.4 二进小波变换与滤波器组	(263)
习题	(266)
参考文献	(269)

绪 论

近 30 年来,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,并且还开辟出许多新的应用领域。今天,数字信号处理已随处可见,人们每天都会接触到各种数字信号处理系统,从 CD 唱机、手持电话、PC 机中的声卡到数字化影像、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均急切地希望对数字信号处理有更多的了解。

1. 信号与数字信号处理

在讨论数字信号处理之前,首先讨论信号的定义。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。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,这类信号称作**连续信号**。

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**。特定的独立变量所对应的信号值称之为幅值。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**,它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。

数字信号处理是用数字或符号的序列来表示信号,通过数字计算机去处理这些序列,提取其中的有用信息。例如,对信号的滤波,增强信号的有用分量,削弱无用分量;或是估计信号的某些特征参数等。总之,凡用数字方式对信号进行滤波、变换、增强、压缩、估计和识别的问题都是数字信号处理研究的对象。

然而,要对上述自然方式产生的模拟信号进行数字信号处理,首先要将模拟信号数字化,一个数字信号处理系统的简单框图如图 1 所示,图中采样保持器的作用是将采样得到的瞬时幅值保留一定的时间间隔,便于 A/D 转换器(模拟/数字转换器)将此瞬时幅值转换成数码。模拟信号到数字信号转换过程中的各种信号如图 2 所示,由于 A/D 转换器采用有限的二进制位,它所能表示的信号幅度也是有限的,这些幅度称为量化电平,A/D 转换器以最接近于当前实际电平的

二进制数码表示该电平,图2中的3位二进制数码只能表示8个电平。量化电平和模拟信号相比一般存在一定的误差,误差的大小和二进制位的多少直接有关。A/D转换后的信号是一串数字,这种信号不但在时间上做了离散化,在幅度上也做了量化,被称作数字信号。对数字信号加工或处理的核心是通用或专用

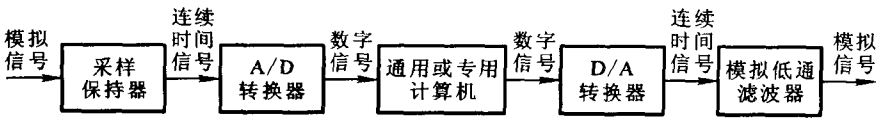


图1 数字信号处理系统的简单框图

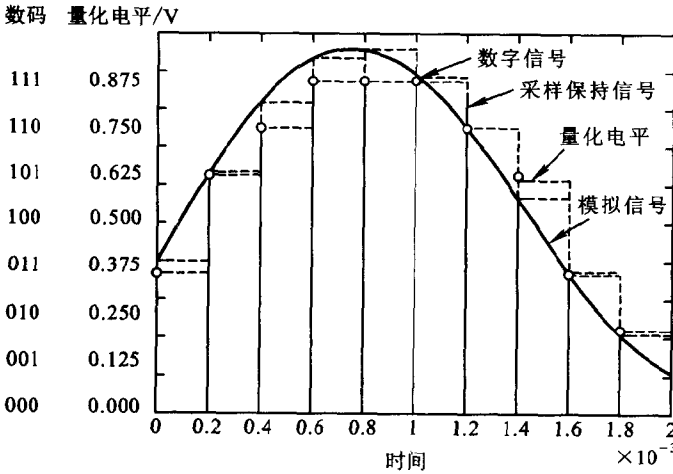


图2 模拟信号转化成数字信号

的计算机(或处理器),处理的结果一般情况下要再还原成模拟信号,这一工作主要由D/A转换器(数字/模拟转换器)完成,见图3。D/A转换器的输出信号类似于采样保持信号,是一阶梯状的连续时间信号,只有通过一模拟低通滤波器(也称作后置滤波器),滤除镜像的高频分量,才能得到平滑的模拟信号。

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

(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17位字长的数字系统就可以达到 10^{-5} 的精度。又如,基于离散傅里叶变换的数字频谱分析仪,其幅值精度和频率分辨率均远远高于模拟频谱分

数码 量化电平/V

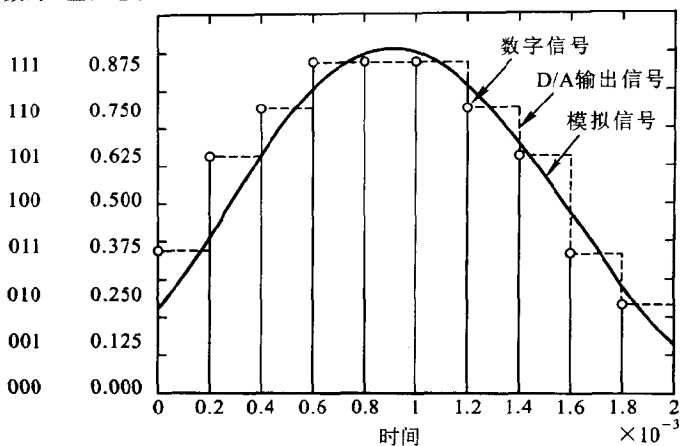


图3 数字信号转化成模拟信号

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;数据压缩方法可以极大地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,实现二维或多维滤波及谱分析等。

当然,数字信号处理系统也存在一定的缺点。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,教材中将讨论 A/D 转换采样频率和被处理信号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上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,在运算速度上和运算精度上为复杂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兹,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钟数百万条指令的水平,使用快速傅里叶变换算法每秒钟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 20 多年的时间里,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断;医学中使用数字信号处理技术对心电(ECG)和脑电(EEG)等生物电信号做分析和处理;新一代的广播体制——数字音频广播(DAB)广泛地使用了数字信号处理技术。表 1 列举出了数字信号处理的应用实例。可以说,数字信号处理技术已在信息处理领域引起了广泛的关注和高度的重视。

表 1 数字信号处理的典型应用

自动控制	消费电子	电子通信
导航和全球定位	数字无线收音机和电视机	自适应均衡
振动分析	智能玩具	ADPCM 变换编码器
声控	数字留言机	蜂窝电话

续表

自动控制	消费电子	电子通信
磁盘驱动控制	扫描仪	频道复合
激光打印控制	洗衣机	数字语音嵌入
机器人控制	机顶盒	IP 电话
自动驾驶	VCD/DVD	无线调制解调器
	可视电话	
	传真机	
	空调	
语 音	图形/图像	工业应用
语音综合	3D 旋转	数字控制
语音增强	图像压缩与传输	安全通道
语音辨识	图像增强	机器人技术
语音编码	图像识别	在线监控
语音邮件		
文本至语音转换		
仪 器	医疗器件	军事器件
数字滤波器	诊断设备	图像处理器
函数发生器	胎儿监听器	导弹制导
锁相环	助听器	导航
瞬时分析仪	病情监控器	雷达处理器
频谱分析仪	心电/脑电	保密通信
数据采集	超声设备	

数字信号处理是用数字计算机来实现各种算法,经典的实现方法可分为软件实现和硬件实现两种。

软件实现是用一台通用的数字计算机运行数字信号处理程序。其优点是经济,一机可以多用;缺点是处理速度慢,这是由于通用数字计算机的体系结构并

不是为某一种特定算法而设计的。在许多非实时的应用场合,可以采用软件实现方法,例如,处理一盘混有噪声的录像(音)带,可以将图像(声音)信号转换成数字信号并存入计算机,用较长的时间一帧帧地处理这些数据,处理完毕后,再实时地将处理结果还原成一盘清晰的录像(音)带。通用计算机即可完成上述任务,而不必花费较大的代价去设计一台专用数字计算机。

硬件实现是针对特定的应用目标,经优化,设计专用的软硬件系统。其优点是容易做到实时处理,缺点是设备只能专用。在硬件实现中,为了使性能与价格比达到最大,并行、复用和流水的概念是很重要的。并行是指为了完成同一个任务,几个处理器同时工作,使系统能胜任单个处理器所不能完成的任务;当一个处理器完成单个任务(比如一个滤波器)有很大的余量时,可让其完成多个任务(比如多个滤波器),这就是复用;流水结构也是多处理器完成同一任务,它与并行结构的主要区别在于并行的各个处理器之间数据交换不多,而流水结构类似于生产中的流水线,数据经一道道“工序”处理。采用并行结构还是流水结构,完全取决于数字信号处理的运算方法。

应当说,随着大规模集成电路的发展,一个复杂数字信号处理系统已可以集成在一个芯片上,即所谓的“片上系统”(简称 SOC, System On Chip),SOC 包含有数字电路、模拟电路、模拟和数字转换电路、微处理器、微控制器以及数字信号处理器等。与传统的集成电路不同的是,嵌入式软件的设计也被集成到了 SOC 的设计流程中,SOC 的设计方法将以组装为基础,采用自上至下的设计方法,在设计过程中大量重复使用自行设计开发或其他第三方拥有知识产权的 IP(Intelligent Property)模块。SOC 子系统要充分考虑如何合理划分软件和硬件所实现的系统功能以及如何实现软、硬件之间的信息传递。总之,SOC 系统将是数字信号处理系统的一个新型的实现方法。

数字信号处理系统设计手段的进步也促进了数字信号处理的发展,以美国 MathWorks 公司的 MATLAB 为代表的应用软件正风靡世界,其中的信号处理工具箱(Signal Processing Toolbox)更是学习和应用数字信号处理的有力工具。

4. 本书的主要内容

本书以确定性信号处理为主要内容。数字信号处理的理论基础是离散线性时不变系统理论和离散傅里叶变换(DFT),这些内容在“信号与线性系统”课程中已做了详细的讨论,本书将做简要的复习并联系数字信号处理中的一些具体问题展开讨论。数字滤波和快速傅里叶变换(FFT)是数字信号处理的经典内容,本书将重点介绍,学习这些内容的同时应当着眼于设计和应用手段的不断更新。数字信号处理器和数字信号处理软件是数字信号处理应用的两大支撑工具,本书结合相关的理论对它们做了必要的介绍,特别是引入了以 MATLAB 为工具的实验。考虑到一些新的发展领域与当前的电子信息系统关系密切并能够

和本书内容成一体系,本书还将介绍多采样率信号处理、离散小波变换等内容。至于最优滤波理论、自适应滤波、二维滤波、数字频谱的参数模型法和高阶谱分析等内容应归入“现代数字信号处理”或“随机信号处理”课程中。

第 1 章 离散时间信号与系统

离散时间信号与系统的理论在“信号与线性系统”这门课程中已做了详细介绍,它是数字信号处理的基础,掌握了这些基础知识之后,才可以深入讨论数字信号处理的其他内容。本章重点复习离散时间信号与系统的理论,在复习这些内容的同时还应密切联系数字信号处理中的一些具体问题去思考,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。这些问题在本章和后续的章节中将逐步得到解决。

1.1 离散时间信号

在数字信号处理中,离散时间信号通常用序列来表示。序列是时间上不连续的一串样本值的集合 $\{x(n)\}$, n 为整型变量, $x(n)$ 表示序列中的第 n 个样本值,符号 $\{\cdot\}$ 表示全部样本值的集合。 $\{x(n)\}$ 可以是实数序列,也可以是复数序列。 $\{x(n)\}$ 的复共轭序列用 $\{x^*(n)\}$ 来表示。为了方便起见也常常省去大括号,直接用 $x(n)$ 表示序列。

1.1.1 几种常用的典型序列

(1) 单位脉冲序列

$$\delta(n) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases}$$

在离散系统中,这个序列 $\delta(n)$ 又称离散冲激,或简称为冲激。它的作用类似于模拟系统中的单位冲激函数 $\delta(t)$,但要注意 $\delta(t)$ 完全是一种数学的极限,并非现实的信号,而 $\delta(n)$ 完全是一个现实的序列。

(2) 单位阶跃序列

$$u(n) = \begin{cases} 1 & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases}$$

它很类似于连续时间信号中的单位阶跃信号。

(3) 矩形序列