



高等学校
电子信息类
规划教材
·『九五』电子部重点教材·本科适用

数字信号处理

(第二版)

姚天任 江太辉

华中科技大学出版社

高等学校
电子信息类

规划教材·“九五”电子部重点教材

数字信号处理

(第二版)

姚天任 江太辉

华中科技大学出版社
(华中理工大学出版社)

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理(第二版)/姚天任 江太辉
武汉:华中科技大学出版社, 2000年9月
ISBN 7-5609-2284-8

I. 数…
II. ①姚… ②江…
III. 数字信号-信号处理
IV. TN911.72

数字信号处理(第二版)

姚天任 江太辉

责任编辑:周筠 李华
责任校对:蔡晓璐

封面设计:刘卉
责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

录排:华中科技大学出版社照排室
印刷:华中科技大学印刷厂

开本:787×1092 1/16

印张:20

字数:468 160

版次:2000年9月第2版

印次:2003年3月第11次印刷

印数:21 501—24 500

ISBN 7-5609-2284-8/TN·57

定价:22.80元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书系统和全面地讨论了数字信号处理的基本理论、基本概念和基本方法。第一章绪论,综述了数字信号处理学科的内容、应用领域和发展方向;第二章介绍离散时间信号和离散时间系统的基本理论;第三章和第四章分别讨论离散傅里叶变换的快速算法和数字滤波器的设计原理;第五章介绍离散时间随机信号的基本概念;第六章和第七章分别讨论有限字长效应的分析方法和功率谱的经典估计方法。为加深对基本理论的理解和对基本方法的掌握,书中安排了丰富的复习思考题和练习题,书末附有习题参考答案。此外,书中还附有一些算法的计算机程序和 MATLAB 文件。

本书可作为高等院校信息与通信工程学科各专业,以及相近专业的教科书,也可作为广大科研人员和工程技术人员的参考书。

出版说明

为做好全国电子信息类专业“九五”教材的规划和出版工作,根据国家教委《关于“九五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》和《普通高等教育“九五”国家级重点教材立项、管理办法》,我们组织各有关高等学校、中等专业学校、出版社,各专业教学指导委员会,在总结前四轮规划教材编审、出版工作的基础上,根据当代电子信息科学技术的发展和面向 21 世纪教学内容和课程体系改革的要求,编制了《1996—2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》。

本轮规划教材是由个人申报,经各学校、出版社推荐,由各专业教学指导委员会评选,并由我部教材办商各专指委、出版社后,审核确定的。本轮规划教材的编制,注意了将教学改革力度较大、有创新精神、特色风格的教材和质量较高、教学适用性较好、需要修订的教材以及教学急需,尚无正式教材的选题优先列入规划。在重点规划本科、专科和中专教材的同时,选择了一批对学科发展具有重要意义,反映学科前沿的选修课、研究生课教材列入规划,以适应高层次专门人才培养的需要。

限于我们的水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能存在不少缺点和不足,希望使用教材的学校、教师、同学和广大读者积极提出批评和建议,以不断提高教材的编写、出版质量,共同为电子信息类专业教材建设服务。

原电子工业部教材办公室

前 言

本教材第二版系按原电子工业部的《1996~2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由全国电子工程专业教学指导委员会编审、推荐出版。本教材由华中理工大学姚天任教授担任主编，西北工业大学赵荣椿教授任主审，北京理工大学梅文博教授任责任编委。

数字信号处理是信息和通信工程各专业的一门技术基础课，也是通信和信息系统、信号和信息处理等专业研究生的入学考试科目之一。多年来，国内外不少专家、学者一直强调，为了使高等学校的毕业生适应信息社会对他们提出的新要求，所有理工科专业和部分经济管理类专业，都很有必要把数字信号处理作为一门必修的技术基础课来设置。本教材的参考学时数为54学时。学习这门课程之前，学生应修过“信号与线性系统”和“复变函数”等课程。学好这门课程可为进一步学习“现代数字信号处理”、“数字语音处理”和“数字图像处理”等研究生课程打下初步的基础。

数字信号处理是一门理论和技术都发展十分迅速、应用非常广泛的交叉和前沿性学科，它的理论性和实践性都很强。因此，在教学过程中要特别强调基本理论、基本概念和基本方法的掌握。为加深对基本理论的理解和对基本方法的掌握，书中安排了一定数量的复习思考题和练习题，书末附有习题参考答案和一些算法的计算机程序。如有条件，最好能安排适当数量的实验和简单的工程设计练习。

本教材第二版与第一版比较，全书的总体结构没有很大变化，但所有章节的内容都是重新编写的。具体地说，第一章是绪论，综述了数字信号处理学科的内容、应用领域和发展方向；第二章介绍离散时间信号和离散时间系统的基本理论和基本分析方法，本章内容是全书的基础；第三章和第四章分别讨论离散傅里叶变换的快速算法和数字滤波器的设计原理，这是数字信号处理学科中两个最基本和最重要的问题；第五章介绍离散时间随机信号的基本概念，这些概念是学习下两章内容和以后学习研究生课程的重要基础；第六章和第七章分别讨论有限字长效应的分析方法和功率谱的经典估计方法，这两部分内容涉及到数字信号处理理论和技术的工程实现以及应用中的具体问题。

本教材第二版中新加入了部分内容，如第二章中增加了关于离散时间信号的取样、抽取和内插的讨论，第三章中增加了对 N 为合数的FFT算法的介绍，第六章对极限环振荡和死带效应进行了更深入的讨论。此外，第五章和第七章是参照国务院学位委员会编的《同等学力人员申请硕士学位信息与通信工程学科综合水平全国统一考试大纲及指南》的要求编写的。

本教材第一章和第五至第七章由姚天任教授执笔，第二至第四章由江太辉教授执笔。

限于编著者的水平，不妥和错误之处一定不少，切盼读者将所发现的问题和对本书的意见径寄作者或寄华中理工大学出版社。

作 者

1999年8月于华中理工大学

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 数字信号处理学科内容	(1)
1.2 数字信号处理的应用领域	(2)
1.3 数字信号处理学科的发展历史	(3)
1.4 数字信号处理的基本运算	(6)
1.5 本书内容安排	(7)
参考文献	(8)
第二章 离散时间信号和离散时间系统	(9)
2.1 概述	(9)
2.2 离散时间信号——数字序列	(9)
2.3 离散时间系统	(13)
2.3.1 线性非移变系统	(13)
2.3.2 系统的稳定性和因果性	(17)
2.3.3 线性常系数差分方程	(19)
2.4 离散时间信号和系统的频域描述	(23)
2.4.1 离散时间信号的傅里叶变换	(23)
2.4.2 离散时间信号的傅里叶变换的性质	(24)
2.4.3 离散时间系统的频率响应	(27)
2.5 信号的取样	(29)
2.5.1 连续时间信号的取样	(29)
2.5.2 离散时间信号的取样	(33)
2.5.3 离散时间信号的抽取和内插	(35)
2.6 Z 变换	(37)
2.6.1 Z 变换的定义	(37)
2.6.2 几种序列的 Z 变换及其收敛域	(38)
2.6.3 Z 变换的逆变换	(41)
2.6.4 Z 变换的性质和定理	(47)
2.6.5 Z 变换与拉普拉斯变换的关系	(53)
2.7 系统函数	(55)
复习思考题	(58)
习题	(58)
参考文献	(63)
第三章 离散傅里叶变换及其快速算法	(65)

3.1 离散傅里叶级数及其性质	(65)
3.1.1 离散傅里叶级数(DFS)	(65)
3.1.2 离散傅里叶级数的性质	(67)
3.2 离散傅里叶变换及其性质	(68)
3.2.1 离散傅里叶变换(DFT)	(68)
3.2.2 离散傅里叶变换的性质	(70)
3.3 利用循环卷积计算线性卷积	(75)
3.4 频率取样	(77)
3.5 快速傅里叶变换(FFT)	(79)
3.5.1 DFT 的计算量	(79)
3.5.2 时间抽选基 2FFT 算法(库里-图基算法)	(80)
3.5.3 蝶形、同址和变址计算	(83)
3.5.4 频率抽选基 2FFT 算法	(86)
3.5.5 IFFT 的计算方法	(89)
3.6 N 为合数的 FFT 算法	(90)
3.7 快速傅里叶变换的应用	(91)
3.7.1 利用 FFT 对信号进行谱分析	(91)
3.7.2 利用 FFT 计算线性卷积	(94)
3.7.3 分段卷积	(96)
3.8 线性调频 Z 变换	(99)
复习思考题	(102)
习题	(103)
参考文献	(106)

第四章 数字滤波器的原理和设计方法	(107)
4.1 概述	(107)
4.2 无限冲击响应(IIR)数字滤波器的基本网络结构	(108)
4.3 有限冲击响应(FIR)数字滤波器的基本网络结构	(112)
4.4 IIR 数字滤波器的设计方法	(120)
4.4.1 冲激响应不变法	(121)
4.4.2 双线性变换性	(123)
4.4.3 数字巴特沃斯滤波器	(125)
4.4.4 数字切比雪夫滤波器	(129)
4.5 IIR 数字滤波器的频率变换	(136)
4.6 FIR 数字滤波器的设计方法	(139)
4.6.1 窗函数法	(139)
4.6.2 频率取样法	(148)
4.7 FIR 数字滤波器与 IIR 数字滤波器的比较	(151)
复习思考题	(152)
习题	(152)

参考文献	(156)
第五章 离散时间随机信号	(157)
5.1 概述	(157)
5.2 随机变量的描述	(158)
5.3 离散随机过程	(163)
5.4 时间平均	(166)
5.5 相关序列和协方差序列的性质	(167)
5.6 功率谱	(170)
5.7 离散随机信号通过线性非移变系统	(173)
复习思考题	(178)
习题	(179)
参考文献	(182)
第六章 数字信号处理中的有限字长效应分析	(183)
6.1 有限字长效应引起的误差	(183)
6.2 二进制数的表示和运算方法及其与量化误差的关系	(186)
6.2.1 定点运算和浮点运算	(186)
6.2.2 原码、补码和反码	(187)
6.2.3 截尾误差和舍入误差	(190)
6.3 信号的量化噪声	(192)
6.4 数字滤波器系数量化的误差分析	(195)
6.4.1 系数量化误差对滤波器稳定性的影响	(195)
6.4.2 系数量化误差对滤波器零点和极点位置的影响	(197)
6.4.3 滤波器频率特性误差的估计	(198)
6.5 有限字长定点运算 IIR 滤波器的输出噪声	(199)
6.6 有限字长定点运算 IIR 滤波器的极限环振荡和死带效应	(204)
6.6.1 极限环振荡	(204)
6.6.2 死带效应	(206)
6.6.3 零输入极限环的边界	(210)
6.7 定点运算 FIR 滤波器和 FFT 算法的误差分析	(214)
6.7.1 定点运算 FIR 数字滤波器	(215)
6.7.2 定点运算 FFT 算法	(216)
6.8 定点运算数字滤波器和 FFT 算法中的溢出问题	(217)
6.9 浮点运算数字滤波器和 FFT 算法中的有限字长效应	(221)
6.9.1 浮点运算 IIR 数字滤波器	(222)
6.9.2 浮点运算 FIR 数字滤波器	(223)
6.9.3 浮点运算 FFT 算法	(226)
复习思考题	(228)
习题	(229)

参考文献	(231)
第七章 功率谱估计的经典方法	(232)
7.1 概述	(232)
7.2 估计理论中的几个基本概念	(233)
7.2.1 评价估计质量的几个参数	(234)
7.2.2 最大似然估计	(235)
7.3 自相关序列的估计	(239)
7.3.1 随机过程的遍历性的进一步讨论	(239)
7.3.2 自相关序列的无偏估计	(244)
7.3.3 自相关序列的有偏估计	(246)
7.4 周期图及其估计质量	(247)
7.4.1 周期图的定义	(247)
7.4.2 周期图的带通滤波器组解释	(248)
7.4.3 周期图的估计质量	(250)
7.4.4 周期图的随机起伏	(258)
7.4.5 自相关的无偏估计的傅里叶变换	(259)
7.5 改善周期图质量的方法	(260)
7.5.1 修正周期图法:数据加窗	(260)
7.5.2 Bartlett 法:周期图的平均	(263)
7.5.3 Welch 法:修正周期图的平均	(265)
7.5.4 Blackman-Tukey 法:周期图的加窗平滑	(269)
7.5.5 各种周期图计算方法的比较	(274)
7.6 MATLAB 在周期图计算中的应用	(273)
7.6.1 周期图	(274)
7.6.2 修正周期图	(274)
7.6.3 Bartlett 周期图	(275)
7.6.4 Welch 周期图	(276)
7.6.5 Blackman-Tukey 周期图	(277)
7.6.6 实例	(278)
复习思考题	(279)
习题	(280)
参考文献	(283)
附录 1 频率抽选基 2FFT 和 IFFT 子程序	(284)
附录 2 例 3.2 所用的程序	(290)
附录 3 例 3.3 所用程序	(292)
附录 4 用窗函数法设计 FIR 数字滤波器的实用程序	(294)
部分习题参考答案	(297)

第一章 绪 论

内 容 提 要

本章具有综述和概论的性质,内容比较广泛但不深入。它的内容与本书以下各章所讨论的内容有密切的关系但却超越了本书的研究范围。具体来说,本章是从数字信号处理整个学科领域的广度来介绍该学科的概貌,包括学科范围、发展历史和动态、实现方法和应用领域,而本书的内容仅涉及数字信号处理学科中的基础知识。学习这些基础知识,是进入数字信号处理学科领域的第一步。

1.1 数字信号处理学科内容

信息科学是研究信息的获取、传输、处理和利用的一门科学。信息要用一定形式的信号来表示,才能被传输、处理、存储、显示和利用,可以说,信号是信息的表现形式,而信息则是信号所具有的具体内容。

数字化、智能化和网络化是当代信息技术发展的大趋势,而数字化是智能化和网络化的基础。实际生活中遇到的信号多种多样,例如广播信号、电视信号、雷达信号、通信信号、导航信号、射电天文信号、生物医学信号、控制信号、气象信号、地震勘探信号、机械振动信号、遥感遥测信号,等等。上述这些信号大部分是模拟信号,也有小部分是数字信号。模拟信号是自变量的连续函数,自变量可以是一维的,也可以是二维或多维的。大多数情况下一维模拟信号的自变量是时间,经过时间上的离散化(取样)和幅度上的离散化(量化),这类模拟信号便成为一维数字信号。因此,数字信号实际上是用数字序列表示的信号。语音信号经取样和量化后,得到的数字信号是一个一维离散时间序列;而图像信号经取样和量化后,得到的数字信号是一个二维离散空间序列。本书只讨论一维数字信号的处理问题。数字信号处理,就是用数值计算方法对数字序列进行各种处理,把信号变换成符合需要的某种形式。例如,对数字信号进行滤波以限制它的频带或滤除噪声和干扰,或将它与其它信号进行分离;对信号进行频谱分析或功率谱分析以了解信号中的频谱组成,进而对信号进行识别;对信号进行某种变换,使之更适合于传输、存储和应用;对信号进行编码以达到数据压缩的目的,等等。

数字信号处理学科的内容非常广泛,这主要是因为它有着非常广泛的应用领域。不同的应用领域对数字信号处理学科提出了各种不同的具体要求,即使是对同一应用领域中的不同问题,所使用的数字信号处理方法也可能是不同的。各应用领域的不同要求推动了数字信号处理的理论和技术的发展,丰富了数字信号处理学科的研究内容。反过来,数字信号处理学科的研究成果,又不断地促进着各应用领域科学和技术的进步。最近一二十年来,数字信号处理学科的这种理论与实际紧密结合并相互促进的特点,表现得尤为突出。

数字信号处理学科有着深厚而坚实的理论基础,其中最主要的是离散时间信号和离散时间系统理论以及一些数学理论。数字信号处理的理论和技术在各应用领域中的实现,依赖于超大规模集成电路技术、计算机技术和软件工程技术,同时还要与各应用领域本身的理论和技术

紧密结合并互相渗透。这样,就不断地开辟出新的数字信号处理领域,例如,数字语音处理、数字图像处理、通信信号处理、雷达信号处理、声纳信号处理、地震信号处理、气象信号处理等新领域。基于这种情况,不少专家和教育工作者提出,应当把数字信号处理列为高等学校各专业,特别是工科各专业的一门技术基础必修课。因此,早在 20 多年前,世界上一些科学技术发展领先的国家都在高等学校中设置了数字信号处理课程;近年来,美国一些大学中已经开发出不少软件和硬件教学工具,利用实验课,借助 Internet 和 MATLAB 等工具,来提高本科生和研究生掌握数字信号处理理论和技术的水平。

1.2 数字信号处理的应用领域

数字信号处理的应用非常广泛,这里只列举部分应用最成功的领域。

(1) 语音处理

语音处理是最早应用数字信号处理技术的领域之一,也是最早推动数字信号处理理论发展的领域之一。该领域主要包括 5 个方面的内容:第一,语音信号分析。即对语音信号的波形特征、统计特性、模型参数等进行分析计算;第二,语音合成。即利用专用数字硬件或在通用计算机上运行软件来产生语音;第三,语音识别。即用专用硬件或计算机识别人讲的话,或者识别说话人;第四,语音增强。即从噪声或干扰中提取被掩盖的语音信号。第五,语音编码。主要用于语音数据压缩,目前已经建立了一系列语音编码的国际标准,大量用于通信和音频处理。近年来,这 5 个方面都取得了不少研究成果,并且,在市场上已出现了一些相关的软件和硬件产品,例如,盲人阅读机,哑人语音合成器,口授打印机,语音应答机,各种会说话的仪器和玩具,以及通信和视听产品中大量使用的音频压缩编码技术。

(2) 图像处理

数字信号处理技术已成功地应用于静止图像和活动图像的恢复和增强、数据压缩、去噪声和干扰、图像识别以及层析 X 射线摄影,还成功地应用于雷达、声纳、超声波和红外信号的可见图像成像。

(3) 通信

在现代通信技术领域内,几乎没有一个分支不受到数字信号处理技术的影响。信源编码、信道编码、调制、多路复用、数据压缩以及自适应信道均衡等,都广泛地采用了数字信号处理技术。特别是在数字通信、网络通信、图像通信、多媒体通信等应用中,离开了数字信号处理技术,几乎是寸步难行。其中,被认为是通信技术未来发展方向的软件无线电技术,更是以数字信号处理技术为基础。

(4) 电视

数字电视取代模拟电视已是必然趋势。高清晰度电视的普及指日可待,与之配套的视频光盘技术已形成具有巨大市场的产业;可视电话和会议电视产品不断更新换代。视频压缩和音频压缩技术所取得的成就和标准化工作,促成了电视领域产业的蓬勃发展,而数字信号处理及其相关技术是视频压缩和音频压缩技术的重要基础。

(5) 雷达

雷达信号占有的频带非常宽,数据传输速率也非常高,因而压缩数据量和降低数据传输速率是雷达信号数字处理面临的首要问题。高速数字器件的出现促进了雷达信号数字处理技术的进步。在现代雷达系统中,数字信号处理部件是不可缺少的,因为从信号的产生、滤波、加工

到目标参数的估计和目标成像显示都离不开数字信号处理技术。雷达信号的数字处理是当今十分活跃的研究领域之一。

(6) 声纳

声纳信号处理可分为两大类,即有源声纳信号处理和无源声纳信号处理。有源声纳系统涉及的许多理论和技术与雷达系统相同。例如,它们都要产生和发射脉冲式探测信号,它们的信号处理任务都主要是对微弱的目标回波进行检测和分析,从而达到对目标进行探测、定位、跟踪、导航、成像显示等目的。它们要应用到的主要信号处理技术包括滤波、门限比较、谱估计等。无源声纳系统与有源声纳系统的主要区别在于,前者不产生和发射声频信号,而只是“倾听”周围的声音,因此,它采用的信号处理技术主要是高分辨率谱估计技术和阵列信号处理技术。

(7) 地球物理学

这是应用数字信号处理技术已有相当长历史的一个领域。该领域中信号处理的主要任务是分析地震信号,建立描述地球内部结构和性质的模型,这对石油和矿藏的勘探很有用。另一任务是用信号处理方法研究地震和火山的活动规律。此外,近年来数字信号处理技术还被应用于大气层性质的研究,如分析大气层中电子的含量。

(8) 生物医学信号处理

数字信号处理技术在医学中的应用日益广泛,如对脑电图和心电图的分析、层析 X 射线摄影的计算机辅助分析、胎儿心音的自适应检测等。

(9) 音乐

数字信号处理技术为音乐领域开辟了一个新局面。在对音乐信号进行编辑、合成,以及在音乐中加入交混回响、合声等特殊效果这些方面,数字信号处理技术都显示出了强大的威力。数字信号处理技术还可用于作曲、录音和播放,或对旧唱片和旧录音带的音质进行恢复等。

(10) 其它领域

数字信号处理技术的应用领域如此广泛,以至于想完全列举它们是根本不可能的。除了以上几个领域外,还有许多其它的应用领域。例如,在军事上被大量应用于导航、制导、电子对抗、战场侦察;在电力系统中被应用于能源分布规划和自动检测;在环境保护中被应用于对空气污染和噪声干扰的自动监测;在经济领域中被应用于股票市场预测和经济效益分析,等等。

1.3 数字信号处理学科的发展历史

在某种意义上,可以认为数字信号处理只不过是许多算法的汇集,因而它是计算数学的一个分支,而计算数学早在 17 世纪至 18 世纪中叶就已经发展起来了,所以,可以说数字信号处理是一个古老的学科。但是,数字信号处理又是一门新兴的学科,因为它的学科体系是在 20 世纪 40 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它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的、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,以至于现在很难脱离其它

学科领域来孤立地谈论数字信号处理学科的发展历史和取得的成就了。

在 20 世纪 40 至 50 年代建立的取样数据系统理论,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推广。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。人们开始用数字相关方法来处理地震信号和大气数据,用数字方法来实现声码器,用数字计算机来计算信号的功率谱。这些数字信号处理研究的初期成果,都是用软件来实现的,占用了相当多的计算机资源和机时,而且一般都无法做到实时处理。

数字信号处理技术的迅速发展是从 20 世纪 60 年代开始的,其主要标志是两项重大进展,即快速傅里叶变换(FFT)算法的提出和数字滤波器设计方法的完善。

早在 1960 年, 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,一般人们都不愿意用宝贵的计算机资源去实践和研究 Good 算法。直到 5 年以后,即 1965 年,当计算机资源不再十分紧缺的时候, J. W. Cooley 和 J. W. Tukey 提出的著名的快速傅里叶变换(FFT)算法才应运而生,并很快得到推广应用,成为数字信号处理领域中的一项重大突破。Cooley 于 1992 年在一篇文章^[1]中详细生动地回忆了他和 Tukey 准备和发表那篇关于 FFT 算法的重要论文(1965 年)前后的情况,其中提到了许多位对 FFT 算法作出贡献的数字信号处理专家,也提到了与 FFT 算法关系密切的早期数学成就,例如,上面提到过的 Good 在 1960 年发表的算法,更早的还有 1942 年 G. C. Danielson 和 C. Lanczos 发表的算法,最早还追溯到伟大的数学家 C. F. Gauss 于 1866 年发表的论文。无论如何, Cooley 和 Tukey 在 1965 年发表的 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从理论走向工程实际,开创了真正意义上的数字信号处理的新时代。在那之前实际上还只是对取样数据而不是对数字信号进行实时处理。FFT 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;同时,从那以后,凡是研究数字信号处理技术的人,都毫无例外地必须对计算机和各种数字硬件(包括后来出现的专用于数字信号处理的功能强大的数字信号处理器)的体系结构进行深入了解,考虑这些硬件的约束条件,研究有限字长效应,等等。

前面提到过,在某种意义上,可以认为数字信号处理是许多算法的汇集。人们很早就认识到了算法的重要注。利用同样速度的计算机、数字信号处理器或数字硬件,如果能设计出很优秀的算法,那么就意味着可以以更高的计算速度和效率来完成对数字信号的处理任务。因此,除了 60 年代关于离散傅里叶变换的快速算法 FFT 外,在 70 年代和 80 年代,人们还对数字信号处理的其它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 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。即使进入 20 世纪 90 年代以后,数字信号处理中关于快速算法的研究也一直没有停止过,例如,在小波分析和人工神经网络方法的研究和应用中,有关快速算法的研究和应用也一直是一个重要的课题。

作为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。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,有的则以运算速度高见长,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作了全面比较,对数字滤波器的基本概念和理论进行了统一。在数字信号处理学科的发展过程中,有限冲激响应(FIR)和无限冲激响应(IIR)两类数字滤波器的地位相对地发生了某些变化。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 FFT 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。早期的数字滤波器虽然在语音、声纳、地震和医学等信号处理中曾经发挥过巨大作用,但由于当时计算机的价格很昂贵,从而严重地阻碍了专用数字滤波器的发展。任何数字信号处理系统,如果只局限于用软件来实现,那么其应用的范围必然会受到很大限制。这一不利局面在 70 年代有了极大的改变,主要原因是大规模和超大规模集成电路技术、高速算术运算单元、双极型高密度半导体存储器、电荷转移器件等新技术和新工艺的出现和结合,加上采用了计算机辅助设计方法,使得数字滤波器的硬件实现有了坚实的物质基础。

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、高通、带通或带阻,或别的形状的特性及其参数)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的问题,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。面对信号和噪声的统计特性一般并不知道或经常变化的情况,在 20 世纪 70 至 80 年代人们开展了对自适应数字滤波器的广泛研究,所取得的成果在通信、雷达、语音、图像等领域获得了广泛的应用。此外,在 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。

回顾数字信号处理学科发展的历史,不能不谈到美国东海岸 3 个世界著名的研究实验室所取得的开创性的工作成就,这 3 个实验室是 Bell 实验室、IBM 的 Watson 实验室和 MIT 的 Lincoln 实验室。这 3 个实验室从一开始就把数字信号处理作为一项长期连续进行研究的课题。Bell 实验室的 Kaiser 提出了关于数字滤波器设计的初期思想。IBM 的 Cooley 和普林斯顿大学的 Tukey 提出了著名的 FFT 算法,尽管后来有人指出那种算法早在 18 世纪 Gauss 就已经提出过。而当时由 Ben Gold 和 Charlie Rader 领导的 Lincoln 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。为此,IEEE 把第一块 Jack S. Kilby 信号处理奖章颁发给了 Gold 和 Rader。早在 20 世纪 60 年代,Gold 和 Rader 就曾预言,许多信号处理问题,特别是语音和雷达信号处理问题,终将用数字方法来很好地加以解决。60 年代末,Lincoln 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,称之为快速数字处理器(Fast Digital Processor, FDP)。在 FDP 上能够在 $136\mu\text{s}$ 时间内完成 16 384 点复数离散傅里叶变换。人们利用 FDP 开发出了世界上第一台取样频率为 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, FDP 被新研制成功的林肯数字信号处理器(Lincoln Digital Signal Processor, LDSP)和林肯数字声音终端(Lincoln Digital Voice Terminal, LDVT)所取代。LDSP 和 LDVT 的体积都要比 FDP 小很多,而其性能却是相同的。LDSP 和 LDVT 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贡献,线性预测无论在当时还是在现在都是语音编码的主要方法。FDP、LDSP 和 LDVT 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, DSP 芯片在现代数字信号处理涉及的所有应用领域中都是不可或缺的。

1.4 数字信号处理的基本运算

各应用领域中提出的各种各样的信号处理问题,都要用适当的理论模型来表示。各种理论模型一般都要归结为一组相互联系的运算,这就是数字信号处理算法。数字信号处理算法,有的比较简单,可能只包含一种基本运算,有的比较复杂,要通过许多种基本运算来完成。例如,数字滤波器可以用差分方程来描述,因此滤波过程就是求解差分方程的过程,或进行线性卷积运算的过程。而计算小波变换的著名快速算法——Mallat 算法,其中包含许多次滤波、抽取和内插等基本运算。下面是数字信号处理中几种常用的最基本的运算:

(1) 差分方程的计算

$$y(n) = \sum_{k=0}^N a_k x(n-k) - \sum_{k=1}^M b_k y(n-k) \quad (1.1)$$

式中, $y(n)$ 表示数字滤波器的输出信号, $x(n)$ 表示滤波器的输入信号, a_k 和 b_k 是滤波器的参数, N 和 M 分别确定了参数 a_k 和 b_k 的个数或滤波器的阶数。滤波器的设计问题,一般归结为根据对滤波器频率特性和技术指标的要求,选择滤波器的结构和计算滤波器的参数 a_k 和 b_k 。若已知 a_k 和 b_k 以及初始条件,即可通过求解式(1.1)所示的差分方程由输入信号求得输出信号。式(1.1)是一个无限冲激响应(IIR)数字滤波器,一般要用递归结构来实现。如果式中的所有 b_k 都等于零,则得到简化的差分方程

$$y(n) = \sum_{k=0}^N a_k x(n-k) \quad (1.2)$$

这是一个有限冲激响应(FIR)数字滤波器,具有非递归结构形式,滤波器参数 a_k 就是滤波器的单位取样响应。

(2) 离散傅里叶变换的计算

时间序列 $x(n)$ 的离散傅里叶变换 $X(k)$ 定义为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1.3)$$

这是一个可逆变换, $X(k)$ 的逆变换式为

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k) e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1.4)$$

式中, N 是输入序列长度,也是变换序列长度。 $e^{j\frac{2\pi}{N}kn}$ 是变换核,这是一个复数。式(1.3)和式(1.4)一般用快速傅里叶变换(FFT)算法来计算。FFT 算法利用了变换核的周期性和对称性,从而把计算量(乘法和加法运算次数)的数量级由原来的 N^2 减小到 $N \log_2 N$, 当 N 的数值较大时,运算量减小了两个数量级。FFT 是以蝶形运算为基础的,蝶形运算具有十分简单的形式

$$X(k) = A \pm BW_N^k \quad (1.5)$$

式中, A 和 B 通常是复数, $W_N^k = e^{j\frac{2\pi}{N}k}$ 是变换核。可以看出,式(1.5)表示的蝶形运算包含一次复数乘法和两次复数加法运算。而一次复数乘法需要 4 次实数乘法来完成。快速算法的研究成果已经能够把完成一次复数乘法运算所需的实数乘法的次数减为 3 次。

(3) 相关运算

序列 $x(n)$ 与序列 $y(n)$ 的相关函数(它也是一个时间序列) $R_{xy}(m)$ 定义为

$$R_{xy}(m) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} y^*(n)x(n+m) \quad (1.6)$$

式中, $y^*(n)$ 是 $y(n)$ 的复共轭, m 是一个序列相对于另一序列的滞后时间。式(1.6)等效于 $y^*(n)$ 与 $x(-n)$ 的卷积运算, 式(1.2)实际上就是序列 a_k 与序列 $x(k)$ 的卷积运算。这种卷积运算通常称为线性卷积。线性卷积可以用循环卷积来计算, 而循环卷积又可通过 FFT 来计算。数论变换用来计算循环卷积, 有着比 FFT 更快的运算速度。相关运算是功率谱估计中的一种基本运算。

(4) 矩阵运算和矩阵变换

在数字信号处理中, 很多计算公式用矢量和矩阵形式来表示会显得特别简明。这就必须用到矢量和矩阵的一些基本运算和变换, 如矢量和矩阵的加法、乘法和乘以标量等运算, 矩阵转置、矩阵求逆、矩阵的 Hermitian 转置、求矩阵的特征值和特征矢量、对矩阵进行特征值分解等。

(5) 振幅平方运算

复数振幅平方的运算是功率谱估计中经常用到的一种运算, 即

$$|X(k)|^2 = X(k)X^*(k) \quad (1.7)$$

(6) 对数运算和指数运算

在同态信号处理中, 对数运算和指数运算是两种最基本的运算。

(7) 调制运算

时间序列 $x(n)$ 乘以复指数序列 $e^{j2\pi nk}$, 将把 $x(n)$ 变换到新的频段上去, 即

$$y(n) = x(n)e^{j2\pi nk} \quad (1.8)$$

式中, 参数 k 表示变换频率与信号 $x(n)$ 的取样频率的比值。

1.5 本书内容安排

从上面的介绍已经可以看出, 数字信号处理的内容是很丰富的。本书是阐述数字信号处理的基本理论和基本方法, 适合于高等学校本科生学习的教科书, 也是科研和工程技术人员进入数字信号处理领域的入门参考书, 因此, 本书选择了快速傅里叶变换、数字滤波器和功率谱估计作为主要讨论对象。为了使这几个主题的讨论能够比较深入, 本书强调了基础理论, 其中包括: 离散时间信号和离散时间系统的分析和离散随机信号的理论。在确定本书主要内容时, 本书的另一个观点是, 要尽可能把理论和实践、原理和应用结合起来。为此, 本书安排了“有限字长效应”一章, 并在快速傅里叶变换、数字滤波器设计和功率谱估计等内容中较多地介绍和讨论了工程计算和实现的问题。在上述 3 个主题中, 本书只选择了它们各自的最基本的内容, 具体来说, 关于 FFT 算法我们把重点放在基为 2 的 FFT 算法原理和实现上, 关于数字滤波器则以 FIR 和 IIR 线性数字滤波器的结构和设计原理为主, 而对于功率谱估计则只限于讨论经典谱估计方法即周期图方法及其各种改进方法。数字信号处理理论和方法中的许多其它内容, 如维纳滤波器和卡尔曼滤波器、自适应滤波器、功率谱估计的现代方法、同态滤波、高阶谱分析、小波变换以及人工神经网络信号处理等, 都放在研究生教材《现代数字信号处理》中讨论。

数字信号处理是一门理论性和实践性都很强的课程, 它需要比较坚实的基础理论, 要求学生在学这门课程之前, 学习过“信号与线性系统”、“线性代数”、“复变函数论”和“计算机原理”等课程。为加深学生对基本概念的理解, 本书各章列出了一些复习思考题; 为了帮助同学们