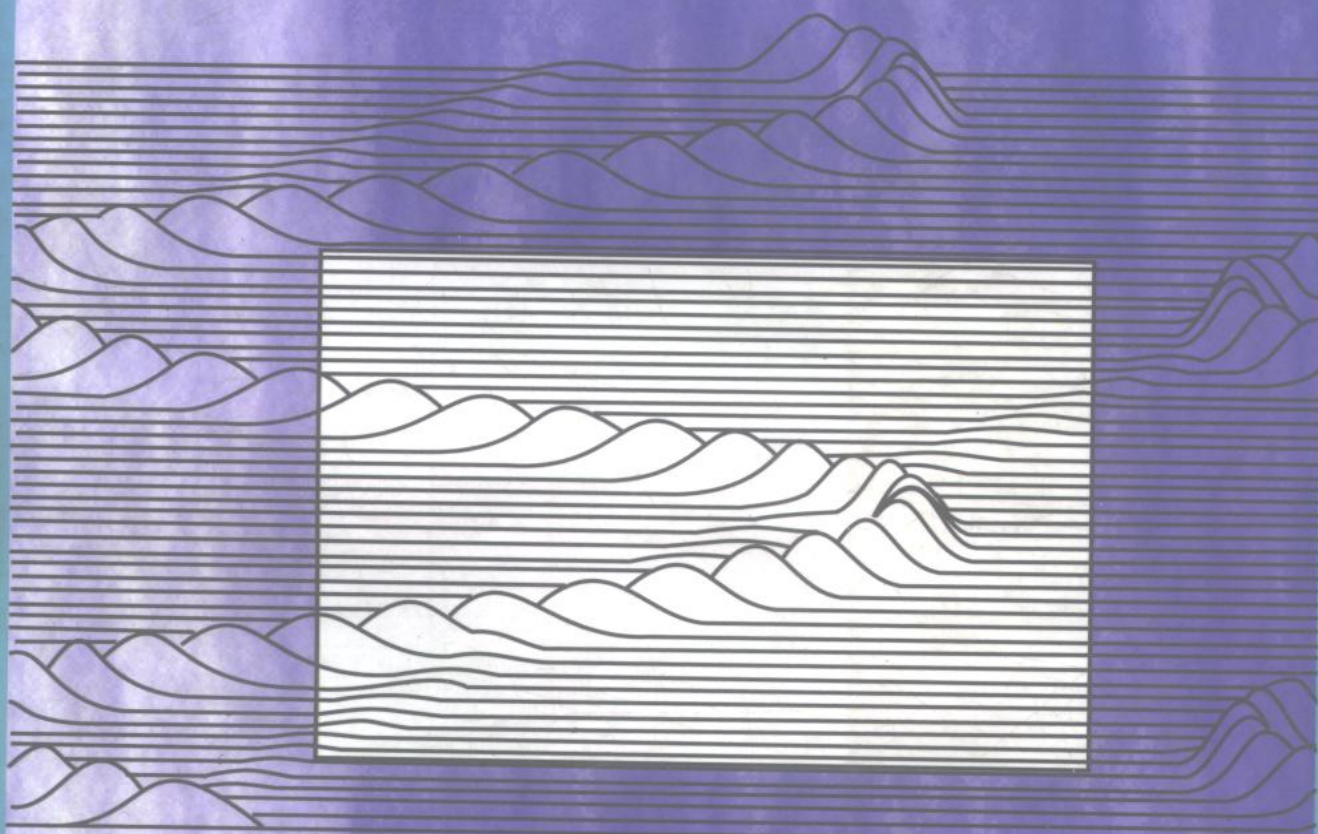


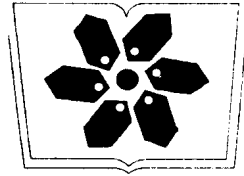
离散时间信号处理

[美] A. V. 奥本海姆 著
R. W. 谢弗

著



科学出版社



中国科学院科学出版基金资助出版

离散时间信号处理

[美] A. V. 奥本海姆 著
R. W. 谢 弗
黄建国 刘树棠 译

科学出版社

1998

内 容 简 介

本书是作者继《数字信号处理》(该书中译本于1980年由科学出版社出版)一书后又一本集中论述离散时间信号处理的新专著。作者在该书的基础上,大幅度增加了对信号处理许多专题的论述,同时删除和压缩了不少内容。本书基本概念清楚,层次安排合理,条理清晰,系统性强,即使是对本书内容基本熟悉的读者,读后也会在建立信号处理整体概念和分析的基本方法及技巧方面有所收获。书中给出不少精选的例题和图表,并包括400多道内容丰富、形式多样的习题,是国际上颇受欢迎的大学本科高年级学生及研究生的教科书。

本书可供从事数字信号处理工作的科技人员,高等学校有关专业高年级学生及研究生、教师阅读。

图书在版编目(CIP)数据

离散时间信号处理/[美]奥本海姆(Oppenheim, A. V.), [美]谢弗(Schafer, R. W.)著;黄建国,刘树棠译.-北京:科学出版社,1998.7

书名原文:Discrete-Time Signal Processing

ISBN 7-03-005877-1

I. 离… II. ①奥…②谢…③黄…④刘… III. 离散信号:时间信号-信号处理 IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 02359 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998年7月第一版 开本:787×1092 1/16

1998年7月第一次印刷 印张:45 3/4

印数:1—1 700 字数:1 063 000

定价:82.00元

0000000000

译者的话

近 20 多年来,信号处理从理论、方法到实际应用都得到了飞速的发展.尤其是随着计算机技术和微电子器件日新月异的突飞猛进,使得数字信号处理技术格外受到人们的重视,其重要性也与日俱增.信号处理已发展成为一门内涵十分丰富的新兴独立学科,成为信息科学的重要组成部分.

信号是信息的载体.人们通过对信号的处理可以传递、存贮和提取所希望获得的各种信息.信号处理就是研究对信号进行各种处理和利用的技术.如果对连续时间信号在时间上量化,就得到离散时间信号;而同时在时间和幅度上均量化,就得到数字信号.利用计算机处理数字信号已表现出许多连续时间信号处理所没有的优越性能,但还有不少实际应用也需要处理离散时间信号.同时,数字信号处理所遇到的基本理论和方法问题除少量特有的外,主要仍属于如何处理离散时间信号的问题.因此,研究离散时间信号处理更具有普遍的意义.由美国 A. V. 奥本海姆和 R. W. 谢弗教授合著的《离散时间信号处理》就是总结该领域基本理论和方法的一部优秀专著.

早在 1975 年,正当数字信号处理理论和方法迅速兴起和获得应用之际,奥本海姆和谢弗就合作出版了《数字信号处理》一书.其中译本于 1980 年出版发行以来,对推动我国信号处理领域的教学和研究起到了很大的作用.其后 10 多年间,信号处理技术又获得很大的进展,作者在原书的基础上,大幅度增加了对信号处理许多专题的论述,同时删除和压缩了不少内容,形成了这本集中论述离散时间信号处理的新专著.本书基本概念清楚,层次安排合理,条理清晰,系统性强.书中给出不少精选的例题和图表,并包括 400 多道内容丰富、形式多样的习题,是国际上颇受欢迎的大学本科高年级及研究生的教科书.其中译本的出版,相信会再次受到我国广大读者的欢迎,对我国信号处理教学和工作的开展将会起促进作用.

本书为中国科学院科学出版基金资助项目.从立项到出版,都得到了有关各方面的大力支持和帮助.尤其是保铮院士、袁保宗教授、何振亚教授及谢一清教授等,他们积极推荐本书出版,并鼓励译者尽快完成这项工作.在本书出版过程中,得到科学出版社有关人士的热情帮助和指导.孙漪、郑家梅、刘春明、杨一文和甄斌等在翻译、整理及校对工作中都做了大量的工作,在此仅向他们表示衷心的感谢.

由于译者水平有限,加之工作繁忙,尤其是一些新的专业术语尚未有统一订名,译文中难免有不妥之处,恳切希望广大读者批评指正.

黄建国 刘树棠

前 言

几年前就打算修改和更新我们于 1975 年出版的第一本教科书《数字信号处理》。现在的这本书就是出自这一最初的想法。那本书所显示出的活力表明了人们对信号处理的浓厚兴趣及信号处理的巨大影响。很明显,随着信号处理实现手段的不断发展,该领域的重要性与日俱增。在开始这项修订工作不久,我们就发现最好还是另写一本新书,这本新书一方面以我们的第一本书为基础,同时还能够让第一本书仍有它的可用之处。

将这本新书的书名定为《离散时间信号处理》有这么几个原因。在 60 年代中期,由于利用数字计算机实现实时信号处理所具有的潜力和灵活性,使得数字信号处理作为信号处理的一个新的分支而崭露头角。“数字信号处理”这一术语指的就是基于数字方法来处理,其固有的内涵既涉及到时间的量化又涉及到幅度的量化。然而,所有在数字信号处理方面的教科书,其主要着眼点都仅局限在时间量化上,也就是仅考虑信号的离散时间特点。另外,很多信号处理技术(例如电荷转移器件和开关电容滤波器)都是离散时间的,但不是数字的,即信号在时间上是被量化了的,而其幅度仍用模拟形式表示。

在 70 年代中期当第一本教科书出版时,数字和离散时间信号处理方面的课程仅在几所大学的研究生课程中设置。现在,其基本原理已在大学本科生中讲授,甚至也作为线性系统方面最重要课程的一部分,或者在大学更高深一些的第三、第四学年或研究生第一学年的课程中讲授。计划写这本新书的主要想法在于认识到这些材料对大学本科生的重要性。特别是,我们大幅度增加了对许多专题的论述,其中包括:线性系统、采样、多采样率信号处理、谱分析及各种应用等。另外,加入了大量的例题来强调和说明许多重要的概念。与此同时,也删除和压缩了部分内容。这本新书包括有 400 多道丰富多彩的习题,并有题解供讲授课程的教师参考。

本书的读者应具有高等微积分(包括复变函数导论)和对连续时间信号的线性系统理论(含拉氏和傅氏变换)等方面的基础知识,这些都是在大多数电气和机械工程系本科生的课程中所讲授过的。有了这些基础知识,本书就可以自成体系。尤其是,不需要预先具备诸如离散时间信号、 z 变换、离散傅里叶变换等方面的知识。在某些章的后几节中,部分内容(例如量化噪声)要求懂一点有关随机信号方面的基本知识,这在附录 A 中给出了一些简单的介绍。

在很多信号处理课程中,一般均包括有一些用计算机完成的作业。本书的很多习题都可以很容易地转变成用计算机来解的练习题。除了少数几个之外,我们都故意地没有给出用以实现本书所述算法的程序。这样做有许多理由,其中最主要的是:在众多的个人计算机和工作站上都有可资利用的各种各样廉价的信号处理软件包,可用于演示和实现信号处理。这些软件包都有详细的注释,良好的技术支持以及方便的用户界面,便于学生使用。再者,这些软件本身都处在一个不断完善的过程中,我们极力主张在课堂上用的软件应该是经过不断考验和更新的版本。我们可能现在有某些偏爱,但无疑会随着时间的推移而变化。然而,我们主张利用计算机解的习题应该独立于任何具体的软件系统或卖主。有时在

本书中偶尔会使用 FORTRAN 程序来说明一些问题,这只是由于 FORTRAN 程序便于阅读,而并不意味着在研究工作中或实际应用中要推荐这些具体的程序.虽然 FORTRAN 在算法的实现上往往不是十分有效的,但是在沟通一个算法的不同部分上仍不失为一种方便的语言.

本书在内容安排上为大学本科生和研究生的使用提供了相当大的灵活性.典型的供大学本科生一学期用的选修课可以覆盖第二章 2.0~2.9 节;第三章 3.0~3.6 节;第四章;第五章 5.0~5.3 节;第六章 6.0~6.5 节;第七章 7.0~7.2 和 7.4~7.5 节及 7.6~7.7 节的简单介绍.如果学生在一般的信号与系统课程中已学过离散时间信号与系统,则可以很快地掠过第二、三章和第四章的内容,而留出富裕的时间来学习第八章.作为一年级研究生的课程,除了上述内容外,还可以包括第五章余下的部分、3.7 节和 6.7~6.10 节涉及一些实际应用的初步考虑、7.6~7.7 节有关最佳 FIR 滤波器的讨论以及第八和第九章离散傅里叶变换及其快速算法(FFT)的全部内容.在第十一章中增加了很多例子来更有效地论述 DFT.对于两学期的研究生课程,则可包括全书的整个内容并附加一些近期取得进展的高级专题.

第二章介绍了离散时间信号与系统的基本类型,并定义了系统的基本性质,诸如线性、时不变性、稳定性和因果性等.本书的主要着眼点放在线性时不变系统上,这是因为有许多成熟的方法可以用于这类系统的分析与设计.尤其是在这一章中通过卷积求和建立了线性时不变系统的时域表示法,并引入了由线性常系数差分方程所描述的一类线性时不变系统(第六章将对这类系统作更详细的讨论).在本章中还通过傅里叶变换引入了信号与系统的频域表示法.第二章重点放在利用傅里叶变换来表示序列(也就是把序列表示为一组复指数的线性组合),以及傅里叶变换的基本性质上.利用傅里叶变换分析线性时不变系统的详细讨论则放在第五章中进行.

在离散时间信号是通过对连续时间信号周期采样而得到的情况下,第三章详细讨论了这两种信号之间的关系,其中包括奈奎斯特采样定理.另外,还讨论了离散时间信号增采样(upsampling)和减采样(downsampling)的概念.这些在多采样率信号处理和采样率转换的系统中都会用到.这一章还包括从连续时间到离散时间转换中所遇到的某些实际问题,其中包括为避免混叠而采用的预滤波,以及当离散时间信号用数字表示时幅度量化效应的建模等问题.

第四章论述 z 变换,把它作为广义傅里叶变换来处理.第五章广泛深入地讨论了如何利用傅里叶变换和 z 变换来表示和分析线性时不变系统.第五章还特别定义了一种理想的频率选择性滤波器,并对由线性常系数差分方程所描述的系统建立了系统函数以及零极点表示法,而该类系统的实现将在第六章中详细讨论.同时,第五章还定义并讨论了群延迟、相位响应和相位失真,以及系统的幅度响应和相位响应之间的关系,其中包括对最小相位、全通和广义线性相位系统等的讨论.

第六章集中讨论由线性常系数差分方程描述的系统,以及用方框图和线性信号流图表示的这类系统.本章的大部分内容是建立各种重要的系统结构,并比较它们之间的一些性质.这些讨论的重要性和各种滤波器结构都基于这样一个事实:在离散时间系统的具体实现中,系数的不准确性和运算误差的影响都与所采用的具体结构密切相关.在具体实现时所用的技术,无论是数字的还是离散时间模拟的,其基本问题都是类似的,在本章中是

通过对数字滤波器的系数量化和运算舍入噪声影响的讨论,来说明在数字实现中的这些基本问题.

第六章主要论述线性常系数差分方程的表示和实现,而第七章则讨论为了逼近某一所要求的系统响应而获得这类差分方程系数的步骤.其设计方法分为无限冲激响应(IIR)滤波器设计和有限冲激响应(FIR)滤波器设计两大类.

在连续时间线性系统理论中,傅里叶变换主要是作为表示信号与系统的一种分析工具.与此对照,在离散时间情况下,很多信号处理系统和算法则涉及到直接计算傅里叶变换.当傅里叶变换本身无法计算时,而它的采样形式,即离散傅里叶变换(DFT)却可以计算出来,并且对有限长信号来说,其DFT就是该信号的完全傅里叶表示.第八章详细讨论离散傅里叶变换及其性质,以及它与离散时间傅里叶变换的关系.第九章介绍并讨论许多重要的用于计算或产生离散傅里叶变换的各种算法,其中包括戈泽尔算法、快速傅里叶变换(FFT)算法以及线性调频变换算法等.

第十章引入离散希尔伯特变换.这种变换产生于各种不同的实际应用,其中包括逆滤波、实带通信号的复数表示、单边带调制技术及许多其它的方面.对于将在第十二章中讨论的称为倒谱分析和同态信号处理的这类信号处理方法来说,这种变换也是十分有用的.

在前面这几章、特别是第二、三、五章和第八章的基础上,第十一章集中讨论如何利用离散傅里叶变换对信号进行傅里叶分析.如果没有对前面所涉及到的问题以及对DFT与傅里叶变换之间的关系有一个透彻的理解,那么利用DFT对一个实际信号进行分析时往往会导致混淆和曲解.在第十一章将会论述许多这样的问题.关于利用依时傅里叶变换对具有时变特性的信号进行傅里叶分析的问题也将进行适当的讨论.

第十二章介绍一类称为倒谱分析和同态信号处理的信号处理方法.这类方法虽然是非线性的,但却都是基于本书前述章节所论述的线性方法的推广.

在本书的写作过程中,我们一直有幸得到许多同事、学生和朋友的宝贵帮助、建议和支持.多年来,我们在麻省理工学院(MIT)和佐治亚理工学院(GIT)的许多同事曾与我们一起讲授过这些材料,并且从他们的观点和看法中受益匪浅.这些同事包括MIT的J.利姆(J. Lim)、B.穆西柯斯(B. Musicus)、V.祖(V. Zue)教授和GIT的T.巴恩韦尔(T. Barnwell)、M.克莱门茨(M. Clements)、M.海斯(M. Hayes)、J.麦克莱伦(J. McClellan)、R.默塞里尤(R. Mersereau)、D.施瓦兹(D. Schwartz)、M.史密斯(M. Smith)教授等.MIT的J.麦克莱伦,V.祖和J.克拉斯(J. Class)教授还慷慨地帮助我们准备了本书中的一些插图.

A. V. 奥本海姆
R. W. 谢 弗

序 言

信息探测、传输系统，如雷达、声纳、导航、通信、地震勘探、医疗检查、射电天文等，有一个共同的任务，这就是从获得的信号中提取有用信息；许多物理实验和工程试验常要求从测得的数据信号中提取所需的参数和特征；日常应用的信号，如语音、图像等，为便于存贮、传输和机器识别，也须作信号处理。可以说，信号处理渗透到科技领域的方方面面，受到广大科技界的重视。

信号处理的发展只是近 30 年的事，此前虽认识到它的重要性，但由于受技术条件的限制，一般只能作简单处理。虽然上述的一些信息探测、传输系统在本世纪的初、中期已经出现，但由于缺乏有效的信号处理，能实现的功能极其有限。只是到了本世纪 60 年代，微电子和计算机技术的长足发展，使得数字存贮、运算等一系列操作变得十分可靠和简单，同时将模拟信号在时间上和幅值上加以量化而得到数字信号并不困难，从而使复杂的信号处理有了实现的可能。因此，从 60 年代开始，信号处理的理论和方法发展极为迅猛、应用推广更为迅速。在短短的数年里，几乎所有信息系统均装备了数字信号处理分机，使整个系统的功能和性能有了革命性的扩展和提高。

为使培养的人才与科技的发展相适应，从 70 年代开始，许多大学相继开设了有关课程，并出版了多种相应的教科书，美国 A. V. 奥本海姆和 R. W. 谢弗教授合著的《数字信号处理》是其中颇受欢迎的一本，它出版于 1975 年，不久传入我国，并于 1980 年被译成中文，由科学出版社出版，为相当多的大学用作教科书，对推动我国数字信号处理的教学起了较大作用。

六七十年代以来，信号处理的发展一直处于良性循环状态。理论、方法与应用的发展相互促进。近二三十年来，新理论、新方法层出不穷，结合微电子技术的发展，信号处理的应用更加深入和扩大。在新的形势下，对信号处理的教学也提出了新的要求，一方面要求针对新的理论、方法和应用开设新的课程；另一方面为根据新发展的要求加强基础教学和适当更新内容。A. V. 奥本海姆和 R. W. 谢弗教授则是根据后一要求，以《数字信号处理》一书为基础，重新写了适合大学本科生和低年级研究生需要的《离散时间信号处理》一书。

新著没有包括信号处理新发展的具体内容（这应当在后续课程里解决），而致力于基础内容的加强和更新，以适应现代信号处理新发展的需要。与旧著相比，新著不仅大幅度增加了有关新发展的基础性专题的论述，对多年来证明重要性不大的内容作了删除和压缩。更主要的是，内容安排更加合理，基本概念的阐述更加透彻，全书条理清晰，系统性强，即便是对本书内容基本熟悉的科技人员，读后也会在建立信号处理整体概念和分析的基本方法及技巧方面有所收获。旧著《数字信号处理》精彩的习题是其特色，受到广泛称赞，这在新著里进一步得到发扬，丰富多彩的 400 多道习题，可以使学生在练习中更深刻地掌握基本概念和方法。

黄建国和刘树棠两位教授多年来一直从事信号处理的科研和教学工作，有很深造诣和丰富经验，他们在本书的翻译中十分认真，反复斟酌，力求做到准确、流畅。相信本书的出版会受到广大读者的欢迎。

保铮 谨识

1996 年 6 月于西安电子科技大学

目 录

译者的话

前言

第一章 绪 论	1
第二章 离散时间信号与系统	6
2.0 引言	6
2.1 离散时间信号:序列	7
2.2 离散时间系统	13
2.3 线性时不变系统	16
2.4 线性时不变系统的性质	22
2.5 线性常系数差分方程	25
2.6 离散时间信号与系统的频域表示	30
2.7 用傅里叶变换表示序列	35
2.8 傅里叶变换的对称性质	40
2.9 傅里叶变换定理	42
2.10 离散时间随机信号	49
2.11 小结	53
习题	53
第三章 连续时间信号的采样	64
3.0 引言	64
3.1 周期采样	64
3.2 采样的频域表示	66
3.3 由样本重构带限信号	70
3.4 连续时间信号的离散时间处理	73
3.5 离散时间信号的连续时间处理	80
3.6 利用离散时间处理改变采样率	82
3.7 实际应用考虑的问题	91
3.8 小结	106
习题	107
第四章 z 变换	123
4.0 引言	123
4.1 z 变换	123
4.2 z 变换收敛域的性质	132
4.3 z 反变换	137
4.4 z 变换的性质	143
4.5 利用围线积分求 z 反变换	149

4.6	复卷积定理	151
4.7	帕斯瓦尔定理	154
4.8	单边 z 变换	155
4.9	小结	158
	习题	158
第五章	线性时不变系统的变换分析	167
5.0	引言	167
5.1	LTI 系统的频率响应	167
5.2	用线性常系数差分方程所表征系统的系统函数	169
5.3	有理系统函数的频率响应	175
5.4	幅度和相位特性之间的关系	190
5.5	全通系统	193
5.6	最小相位系统	198
5.7	广义线性相位的线性系统	207
5.8	小结	224
	习题	224
第六章	离散时间系统结构	242
6.0	引言	242
6.1	线性常系数差分方程的方框图表示	243
6.2	线性常系数差分方程的信号流图表示	247
6.3	IIR 系统的基本结构	249
6.4	转置形式	256
6.5	FIR 系统的基本网络结构	259
6.6	格型结构	263
6.7	有限精度数值效应概述	271
6.8	系数量化的影响	277
6.9	数字滤波器中舍入噪声的影响	291
6.10	IIR 数字滤波器定点实现中的零输入极限环	308
6.11	小结	313
	习题	314
第七章	滤波器设计方法	333
7.0	引言	333
7.1	由连续时间滤波器设计离散时间 IIR 滤波器	335
7.2	低通 IIR 滤波器的频率变换法	356
7.3	离散时间 IIR 滤波器的计算机辅助设计	362
7.4	用窗函数法设计 FIR 滤波器	367
7.5	凯泽窗法设计 FIR 滤波器举例	379
7.6	FIR 滤波器的最佳逼近	385
7.7	FIR 等波纹逼近举例	399
7.8	IIR 和 FIR 数字滤波器的评价	405
7.9	小结	407
	习题	407

第八章 离散傅里叶变换	426
8.0 引言	426
8.1 周期序列的表示:离散傅里叶级数	426
8.2 离散傅里叶级数的性质	430
8.3 周期序列 DFS 表示的性质汇总	434
8.4 周期信号的傅里叶变换	435
8.5 对傅里叶变换采样	436
8.6 有限长序列的傅里叶表示:离散傅里叶变换	438
8.7 离散傅里叶变换的性质	442
8.8 离散傅里叶变换的性质汇总	453
8.9 用离散傅里叶变换实现线性卷积	453
8.10 小结	464
习题	464
第九章 离散傅里叶变换的计算	480
9.0 引言	480
9.1 离散傅里叶变换的高效计算	481
9.2 戈泽尔算法	483
9.3 按时间抽取的 FFT 算法	485
9.4 按频率抽取的 FFT 算法	494
9.5 FFT 算法的实现	499
9.6 复合数 N 的 FFT 算法	504
9.7 用卷积实现 DFT	514
9.8 离散傅里叶变换计算中有限寄存器长度的影响	519
9.9 小结	529
习题	530
第十章 离散希尔伯特变换	546
10.0 引言	546
10.1 因果序列傅里叶变换实部和虚部的充分性	547
10.2 有限长序列的充分性定理	552
10.3 幅度与相位间的关系	556
10.4 复序列的希尔伯特变换关系	557
10.5 小结	568
习题	568
第十一章 利用离散傅里叶变换的信号傅里叶分析	573
11.0 引言	573
11.1 利用 DFT 的信号傅里叶分析	573
11.2 正弦信号的 DFT 分析	576
11.3 依时傅里叶变换	589
11.4 利用依时傅里叶变换的块卷积	595
11.5 非平稳信号的傅里叶分析	596
11.6 平稳随机信号的傅里叶分析:周期图	602
11.7 利用自相关序列估计的随机信号谱分析	612

11.8 小结	622
习题	622
第十二章 倒谱分析和同态解卷积	632
12.0 引言	632
12.1 复倒谱的定义	632
12.2 同态解卷积	634
12.3 复对数的性质	637
12.4 复倒谱的另一种表示	639
12.5 指数序列的复倒谱	640
12.6 最小相位和最大相位序列	642
12.7 特征系统 $D.[\cdot]$ 的实现	647
12.8 同态滤波举例	655
12.9 在语音处理中的应用	671
12.10 小结	677
习题	677
附录 A 随机信号	687
A.1 离散时间随机过程	687
A.2 平均	688
A.3 相关序列和协方差序列的性质	691
A.4 随机信号的变换表示	692
附录 B 连续时间滤波器	695
B.1 巴特沃兹低通滤波器	695
B.2 切比雪夫滤波器	696
B.3 椭圆滤波器	698
参考文献	700
姓名译名对照表	714
汉英名词对照索引	715

第一章 绪 论

信号可以用于沟通人类之间,或人与机器之间的联系;用以探测我们周围的环境,并揭示出那些不易观察到的状态和构造细节,以及用来控制和利用能源与信息.信号处理关心的是信号的表示、变换和运算,以及它们所包含的信息.例如,我们可能希望分开两个或多个多少有些混在一起的信号,或者想增强信号模型中的某些成分或参数.几十年来,信号处理在诸如语音与数据通信、生物医学工程、声学、声纳、雷达、地震、石油勘探、仪器仪表、机器人、日用电子产品以及其它很多的这样一些广泛的领域内起着关键的作用.

高级信号处理算法和硬件广泛应用于各种系统,从高性能的军用系统到工业应用,直至廉价大宗的日用电子产品等都是如此.虽然我们把家庭娱乐系统、如电视和高保真度音响等的性能都认为是理所当然的,其实这些系统的好坏都强烈地依赖于信号处理目前发展的水平.再举一个例子——语音合成,它很快地就在自动声音响应系统以及像助学器和玩具等日用产品中得到了应用,并且以惊人的速度从研究文献步入到军事、工业和商用系统中.

信号处理这一领域总是得益于它的理论、应用与实现信号处理系统的工艺之间的紧密联系.早在60年代之前,信号处理手段几乎无一例外地都是连续时间的模拟技术*.数字计算机和微处理器的发展,连同某些重要的成果一起产生了向数字技术方面的倾斜,导致了数字信号处理领域的出现.数字信号处理的一个基本点是基于样本序列的处理.数字信号处理技术的离散时间特性也是其它一些信号处理技术的特性,如声表面波(SAW)器体、电荷耦合器件(CCD)、电荷转移器件(CTD)和开关电容技术等.在数字信号处理中,信号是用有限精度的数的序列来表示的,并且用数字运算来实现处理.更为一般的术语离散时间信号处理既包含了作为一种特殊情况的数字信号处理,也包含了用其它一些离散时间技术处理样本序列(采样数据)的可能.离散时间信号处理和数字信号处理这两个术语之间的区别往往不是很重要的,因为两者关心的都是离散时间信号.

虽然有很多例子其中要处理的信号本身就是序列,但是大多数的应用还是涉及到要用离散时间技术来处理连续时间信号.在这种情况下,一个连续时间信号先要把它转换成一个样本序列,即一个离散时间信号.经过离散时间处理后,再把输出序列转换成连续时间信号.对于这样一些系统来说,往往都希望它们能实时工作.这就意味着离散时间系统要以对连续时间信号采样的同一速率来完成输出样本的计算.连续时间信号的离散时间处理在通信系统、雷达、声纳、语音和视频编码及增晰、生物医学工程等方面都是司空见惯的.

大多数传统信号处理都涉及到处理一个信号而得到另一个信号.因此,另一类重要的信号处理问题就是信号解释.在这类问题中,处理的目的是为了得到一个输出信号,而

* 一般说来,我们把“时间”当作独立变量,即使在某些特定场合,独立变量可能取其它任何可能的量纲.这样,连续时间和离散时间都应分别看作是连续独立变量和离散独立变量的通用术语.

是要得到该输入信号的某一特征. 例如, 在语言识别和理解系统中, 其目的是为了了解输入信号, 或者从输入信号中提取信息. 一般说来, 这种系统起着一种预处理(滤波、参量估计等)的作用, 在其之后紧跟着一个模式识别系统, 以产生某种符号表示, 例如该语音的某一音素再现等. 这种符号的输出可以依次作为一个能提供最终信号解释的符号处理系统(例如基于规则的专家系统)的输入.

还有另一类比较新的信号处理方法, 它涉及到信号处理表达式的符号运算. 这种处理形式在信号处理工作站和信号处理系统的计算机辅助设计中是特别有用的. 在这类处理中, 信号与系统是用抽象数据来表示和运算的. 像 LISP 这样一些面向对象的程序语言为运算信号与系统以及信号处理表达式提供了方便的环境, 而不用明确求出数据序列, 并为这一类处理打下了基础. 设计用来对信号表达式进行处理的系统的复杂程度直接受基本信号处理概念、定理和性质(如像形成本书的那些基础内容)的影响. 例如, 一种信号处理环境具有在时域卷积相当于频域相乘这样的性质, 则用它可以探索各种不同滤波结构的组合, 其中包括如何直接利用离散傅里叶变换和快速傅里叶变换算法. 同理, 具有采样率和混叠之间关系的环境, 就能够在滤波器实现中有效地利用抽取和内插的方法. 当然, 有关计算机辅助设计系统的面向对象环境的建立, 现在仍处于初级阶段, 有关它的详细讨论已超出了本书的范畴. 然而, 重要的是要认识到, 不应将作为本书主题的一些基本概念只看作是理论上的东西, 它们很可能要成为计算机辅助信号处理环境和工作站中的一个完整部分.

信号处理问题自然不仅限于一维信号. 虽然在理论上一维与多维信号处理之间存在着一些基本的差别, 但是本书所讨论的大部分内容在多维系统中都有其直接的对应关系. 多维数字信号处理理论在 Dudgeon and Mersereau(1984)以及 Lim(1989)* 所著的书中均有详细的论述. 许多图像处理的应用问题需要用到二维信号处理技术. 如视频编码、医学图像、航空摄影的增强与分析、卫星气象照片的分析, 以及从月球和深层空间探测来的视频传输信号的增强等等就属于这一类情况. 多维数字信号处理在图像处理方面的应用在 Andrews and Hunt(1977)、Castleman(1979)、Pratt(1978)以及 Macovski(1983)等人的著作中都有专门的论述. 在石油勘探、地震检测和核试验监测等方面都需要分析地震数据, 这些也都要用到多维信号处理技术. 有关在地震学方面的应用在 Robinson and Treitel(1980)、Robinson and Durrani(1985)的著作中均有论述.

多维信号处理仅仅是众多前沿和专门论题中的一个, 这些论题所依赖的基础均在本书的覆盖范围之内. 基于利用离散傅里叶变换和信号建模的谱分析又是信号处理另一个丰富而重要的方面. 我们介绍了这方面的很多内容, 大都集中在与离散傅里叶变换应用有关的一些基本概念和技术上. 除了这些技术以外, 各种谱分析方法都以某种方式依赖于特定的信号模型. 例如称之为最大熵法(MEM 谱分析)的高分辨率谱分析方法, 就是根据把要分析的信号先表示成一个离散时间线性时不变滤波器对单位脉冲或白噪声的响应, 然后估计出该系统的参数(例如差分方程的系数), 再求出该滤波器模型频率响应的幅度平方来完成谱分析. 对这种方法用于信号建模和谱分析方面的有关论题和技术的全面而详细的论述都是以本书的基本原理为基础的. 这些方面的详细讨论可以在 Kay(1988)和

* 全书中作者的名字和年代均用来指明本书末尾所列参考文献中的著作或论文.

Marple(1987)的著作中找到。

信号建模在数据压缩和编码中也起着重要的作用,同时差分方程的基本原理也对理解这些技术的很多方面奠定了基础。例如,一种称为线性预测编码(LPC)的信号编码技术就是利用这样一个概念:如果一个信号是某个离散时间滤波器的响应,那么在任意时刻的信号值就是先前那些值的线性函数(因此可以由先前信号值而线性预测出当前信号值)。这样,通过估计出这些预测参数,并与预测误差一起来表示信号,就可以得到有效的信号表示。若需要时,该信号也可以利用模型参数重新产生。这类信号编码技术在语音编码中一直是十分有效的。在 Jayant and Noll (1984), Markle and Gray (1976)以及 Rabiner and Schafer(1978)的著作中均有非常详细的论述。

另一个非常重要的前沿论题是自适应信号处理。本书的重点几乎全放在线性时不变系统上。自适应系统代表着一种特殊的时变且在某种意义上是非线性的系统。该类系统具有广泛的应用,而且对它们的分析与设计已形成了一套很有效的技术。同样,这些技术的很多方面也都是以本书所讨论的离散时间信号处理的基本原理为基础的。有关自适应信号处理的详细论述可见 Haykin(1986)及 Widrow and Stearns(1985)的著作。

这些仅仅代表了由本书包括的那些内容中延伸出来的众多前沿论题中的几个方面。其余的还包括一些先进的和专门的滤波器设计方法、计算傅里叶变换的各种专门算法、特定的一些滤波器结构,以及各种近代的多采样率信号处理技术等等。有关这些方面的介绍包括在 Lim and Oppenheim(1988)的著作中。

人们常常都认为,一本基础教科书的目的是揭示而不是包罗某一学科。我们一直遵循着这一宗旨来精选本书的内容及其深度。前述有关前沿论题的简单讨论和书末所附的参考文献就是想尽力展现出这些基本原理所要揭示的丰富多彩的各个方面。

历史的回顾

离散时间信号处理有着漫长而丰富的历史,它以不均匀的步伐走过了很长的历史时期。自17世纪发明微积分以来,科学家和工程师们就已经利用连续变量函数和微分方程来表示物理现象所建立的各种模型。为了求解这些方程,当解析解不可能时就已经使用了数值解法。确实,牛顿使用过的有限差分法就是本书介绍的某些离散时间系统的特例。18世纪的数学家,像欧拉,伯努利和拉格朗日等建立了数值积分和连续变量函数的内插方法。由 Heideman, Johnson and Burrus(1984)等人所进行的令人关注的研究表明:早在1805年,高斯就发现了快速傅里叶变换(在第九章中讨论)的基本原理,而这时傅里叶关于函数的谐波级数表示法的论文尚未发表!

直到50年代初,信号处理还是用模拟系统来完成的,实现这些模拟系统多是用电子线路,甚至还有用机械装置的。虽然数字计算机逐渐在商业和科学实验室获得应用,其价格却异常昂贵,能力也相当有限。在那个时期,某些应用领域对更为高级的信号处理的需求激发了人们对离散时间信号处理的极大兴趣。数字计算机在数字信号处理方面最初获得应用的一个领域就是石油勘探,当时可以将地震数据用磁带记录下来,以便事后处理。这类信号处理一般来说是不能实时完成的,几秒钟的数据往往要耗去几分钟,甚至几个小时的计算机时间。即便如此,由于数字计算机的灵活性使得这种方法也颇受欢迎。

在50年代,数字计算机在信号处理方面的应用以另外一些不同的方式出现。由于数

字计算机的灵活性,在用模拟硬件实现某一信号处理系统之前,在数字计算机上先对该系统进行仿真往往是很有用的.在这种情况下,一种新的信号处理算法或系统在经济和工程资源上投入实施之前,均可在一种很灵活的实验环境中加以研究.这类仿真的典型例子就是由林肯实验室和贝尔实验室所完成的声码器的仿真.例如,在实现一个模拟信道的声码器中,滤波器的特性会影响已编码语音信号可理解的质量,而对这种质量又很难客观地进行定量研究.通过计算机仿真可以调整这些滤波器特性,从而对语音编码系统可理解的质量能在模拟装置构成之前就确定下来.

在所有这些利用数字计算机进行信号处理的例子中,计算机在灵活性方面表现出了极大的优越性.但是,这些处理未必总是能实时完成.因此,盛行一时的仅是将数字计算机用作逼近或仿真某一模拟信号处理系统.与此相仿,早期的数字滤波就非常关注这样一些问题:把一个滤波器在数字计算机上编成程序,这样就可以将信号先作模数转换,然后进行数字滤波,再接着作数模转换,以使整个系统近似成为一个好的模拟滤波器.在语音通信、雷达信号处理或任何一种其它应用中,数字系统可能真正实现实时信号处理的想法在当时似乎认为是最值得尝试和最为乐观的.当然,处理速度、成本和体积大小都曾使人们偏向于应用模拟元件的三个重要因素.

在数字计算机上实现信号处理的同时,研究人员自然有一种愿望要试试日益增长的一些优越的信号处理算法.某些算法就是由于数字计算机的灵活性而产生的,但用模拟设备是无法实现的.因此,很多这些算法都曾被看作是一些有趣的,但多少有些不切实际的想法.这类算法的一个例子就是所谓的倒谱分析和同态滤波技术.在数字计算机上都曾明确地表现出,这些技术应用在语音带宽压缩系统、解卷积和回声检测与抵消上性能优越.然而,实现这些技术要求具体求出信号傅里叶变换之对数的傅里叶反变换,而所要求的傅里叶变换的准确度和分辨率都使得模拟频谱分析仪无法实现.这样一些信号处理算法的发展使得用全数字化来实现信号处理系统的想法更富有吸引力.最初在数字声码器、数字频谱分析仪以及其它全数字化系统的研究上开始了积极有效的工作,希望这样一些系统最终会变成可以实际应用的系统.

Cooley and Tukey(1965)发现的一种计算傅里叶变换的高效算法进一步加速了迈向离散时间信号处理的进程.这种算法就是现在称为快速傅里叶变换或FFT的算法.以下几个理由充分说明FFT是很有意义的.当时用数字计算机实现的许多信号处理算法所要求的处理时间要比实时处理大几个数量级.谱分析常常是信号处理中的一个重要环节,但当时却没有一种有效的方法来实现它.而快速傅里叶变换算法将傅里叶变换的计算时间减少了几个数量级,使得一些高级信号处理算法的实现在其处理时间内允许与系统之间可以在线交互试验.再者,快速傅里叶变换算法事实上可以用专用数字硬件来实现,这样从前出现的很多曾认为是不切实际的信号处理算法开始显露出具体实现的可能.

快速傅里叶变换算法的另一个重要的含意就是它本身属于离散时间范畴.它可以直接计算离散时间信号或序列的傅里叶变换,并且它所涉及到的许多性质和数学方法的确都属于离散时间范畴,而不是对连续时间傅里叶变换的简单近似.由此激发了人们用离散时间数学方法来重新阐明很多信号处理的概念和算法,之后这些技术建立了真正的离散时间域内的各种联系.这样就改变了只是把在数字计算机上进行信号处理单纯地看作是

对模拟信号处理技术的某种近似的看法,而产生了把离散时间信号处理作为一门单独的重要研究领域的浓厚兴趣。

离散时间信号处理发展史上的另一个主要进展出现在微电子学领域。微处理器的发明及其在数量上的激增为离散时间信号处理的廉价实现铺平了道路。尽管第一台微处理器因速度太慢而不能实时地实现大部分离散时间系统。但是到了 80 年代中期,集成电路工艺已经发展到了一个新的水平,能够制造出在结构上专门为实现离散时间信号处理算法而设计的高速定点和浮点微型计算机。由此展现出离散时间处理技术获得广泛应用的灿烂前景。

微电子学工程师们仍在继续为提高电路的集成度和数量而奋斗着,因此微电子学系统的复杂性和先进程度也在不断地稳步提高。随着整片(wafer-scale)集成技术的迅速发展,廉价、超微型及低功耗的复杂离散时间处理系统也将会实现。因此,离散时间信号处理的重要性无疑仍会与日俱增。确实,未来这一领域的发展很可能比我们刚刚描述的发展进程更富有戏剧性。当前,离散时间信号处理技术在某些应用领域已经引起了革命性的变化。电信领域就是一个显著的例子,在该领域中离散时间信号处理技术、微电子技术和光纤传输技术的结合,正以一种真正的革命方式改变着通信系统的面貌。可以预见,类似的冲击也将会波及到许多其它的技术领域。

虽然离散时间信号处理是一个不断更新和飞速发展的领域,但是它的基础已经日臻完善。本书的目的就是为了在离散时间线性系统、滤波、采样及离散傅里叶变换分析等理论方面能给出一种条理清晰的论述。所论述的这些内容应该为读者理解离散时间信号处理的广泛应用提供必要的知识,并为他们对这一令人振奋的技术领域的继续发展作出贡献奠定基础。