

• 信息与计算科学专业系列教材 •

林
川
陈绍林
编著

数字信号处理



全国优秀出版社
武汉大学出版社

• 信息与计算科学专业系列教材 •

林川
陈绍林
编著

数字信号处理



全国优秀出版社
武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/林川,陈绍林编著. —武汉: 武汉大学出版社,
2004. 8

(信息与计算科学专业系列教材)

ISBN 7-307-04360-2

I. 数… I. ①林… ②陈… III. 数字信号—信号处理—高
等学校—教材 N. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 085162 号

责任编辑:顾素萍

责任校对:黄添生

版式设计:支 笛

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: wdp4@whu.edu.cn 网址: www.wdp.whu.edu.cn)

印刷: 湖北科学技术出版社黄冈印刷厂

开本: 850×1168 1/32 印张: 11.5 字数: 294 千字

版次: 2004 年 8 月第 1 版 2004 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 7-307-04360-2/TN·17 定价: 16.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购买我社的图书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题,
请与当地图书销售部门联系调换。



信息与计算科学专业
系列教材

编委会

主任委员

费浦生

委员

陆君安

郑慧饶

胡宝清

莫忠息

黄象鼎

内 容 提 要

本书介绍数字信号处理的基本理论和基本分析方法以及数字信号处理的基本实现。包括时域和变换域的离散信号和系统理论分析、Z-变换、离散 Fourier 变换、快速 Fourier 变换 (FFT)、数字滤波结构、数字滤波器的设计。本书可作为大专院校信息与计算科学、应用数学、电子工程、通信工程、信息工程、信息工程与无线电信息等专业本科生的教科书,也可作为这些专业和相关专业研究生的参考书,并可供在通信、雷达、遥感、声纳、生物医学、地震数字处理等有关领域从事信号处理的科技与工程技术人员自学参考。

出版说明

1998年,教育部颁布了经调整后的高等学校新的专业目录,从1999年秋季开始,各院校开始按新的专业设置进行招生。信息与计算科学专业是在这次调整中设置的,是以信息处理和科学与工程计算为背景的,由信息科学、计算科学、运筹与控制科学等交叉渗透而形成的一个新的理科专业。目前,社会对这方面的人才需求越来越多,开办这个专业的院校也越来越多。因此,系统地出版一套高质量的相关教材是当务之急。

由于信息与计算科学专业是一个新设的专业,有关该专业的人才培养模式、培养目标、教学计划、课程体系、教材建设等一系列专业建设问题,各院校目前正在积极地研究和探索。为了配合全国各类高校信息与计算科学专业的教学改革和课程建设,推进高校信息与计算科学专业教材的出版工作,在有关专家的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织成立了信息与计算科学专业系列教材编委会,制定了教材出版规划。

编委会一致认为,规划教材应该能够反映当前教学改革的需要,要有特色和一定的前瞻性。规划的教材由个人申报或有关专家推荐,经编委会认真评审,最后由出版社审定出版。对这批教材的编写力求做到教学改革力度大、有创新精神、有特色风格、深入浅出、可读性好、实用性强,以满足全国各类高校21世纪初信息与计算科学专业及相关专业的教学需要。

限于我们的水平和经验,这批教材在编审、出版工作中还可

能存在不少的缺点和不足，希望使用本系列教材的教师、同学和其他广大读者提出批评和建议。

信息与计算科学专业系列教材编委会

前 言

本书是作者在武汉大学信息与计算科学系开设的数字信号处理课程中总结教学实践经验的基础上编写而成的。数字信号处理是一门专业基础课,可作为通信工程、信息工程、电子工程、应用数学专业的大学生的学习。编写的目的是使读者能理解离散时间信号和系统的基本理论、基本分析方法以及掌握 FFT、Z-变换、数字滤波器等数字信号处理技术。本书选材注意少而精,尤其将信号与系统的相关内容 with 信号处理有机地结合了起来,使得以前未学习过信号与系统的读者能够较容易上手。

全书共分六章,第 1 章和第 2 章是数字信号处理的理论分析基础,第 1 章为时域离散信号与系统,包括了时域离散信号与系统的基本概念、差分方程等。第 2 章为变换域中的离散时间信号,包括序列的 Fourier 变换和 Z-变换。第 3 章是快速 Fourier 变换 (FFT)。第 4 章介绍了变换域中的系统分析。数字滤波器的基本结构和理论设计基础部分放在第 5 章和第 6 章。

本书的定位是大学本科“数字信号处理”课程的教材,对信号处理的基础理论和基本算法进行了充分的论述和讨论。

本书由林川主编,第 3 章的内容由陈绍林编写,同时整理了部分插图。该书由程卫生副教授主审,并提出了许多宝贵意见。在编写中得到了武汉大学信息与计算科学系领导和同事们的热情指导和关心,在此一并表示衷心的感谢!

最后,编者要向所有关心和支持本书出版的人们,包括家人

致以敬意，是他们的关怀和帮助使得本书得以出版。

由于编者水平有限，且编写时间仓促，难免有错误与不当之处，希望读者给予批评指正，不胜感激！

编 者

2004 年 6 月于武汉

目 录

第 1 章 时域离散信号和系统	1
1.1 时域离散信号——序列	2
1.1.1 时域表示方法	2
1.1.2 序列的运算	6
1.1.3 序列的分类	10
1.2 典型序列及其表示	14
1.2.1 一些基本的序列	14
1.2.2 序列的周期性	19
1.3 离散时间系统	20
1.3.1 离散时间系统的分类	20
1.3.2 冲激和阶跃响应	26
1.4 LTI 离散时间系统的时域特性表示	27
1.4.1 输入输出关系	27
1.4.2 冲激响应的连接	28
1.4.3 冲激响应的稳定条件	32
1.4.4 冲激响应的因果条件	33
1.5 有限维 LTI 离散时间系统	35
1.5.1 常数系数线性差分方程的求解	36
1.5.2 零输入响应和零状态响应	39
1.5.3 离散时间系统的冲激响应	41
1.5.4 关于 BIBO 稳定性的特征方程根	43
1.5.5 LTI 离散时间系统的分类	44

习题	45
第2章 变换域中的离散时间信号	47
2.1 离散时间 Fourier 变换	48
2.1.1 定义	48
2.1.2 收敛条件	51
2.1.3 限带信号(bandlimited signals)	56
2.1.4 离散时间 Fourier 变换的特性	56
2.2 离散 Fourier 变换	58
2.2.1 定义	58
2.2.2 矩阵关系	61
2.2.3 离散 Fourier 变换的性质	63
2.3 Z-变换	76
2.3.1 定义	77
2.3.2 Z-变换的收敛域	78
2.3.3 典型序列的 Z-变换	84
2.3.4 逆 Z-变换	88
2.3.5 Z-变换的基本性质	97
2.3.6 利用 Z-变换解差分方程	112
习题	115
第3章 快速离散 Fourier 变换(FFT)	121
3.1 引言	121
3.2 时域抽取基 2 FFT 算法	123
3.3 频域抽取基 2 FFT 算法与 IDFT 快速算法	130
3.3.1 频域抽取基 2 FFT 算法	130
3.3.2 IDFT 的快速算法	136
3.4 基 r FFT 算法	137
3.4.1 基 2 FFT 递推公式	138

3.4.2 基 r FFT 算法	143
3.4.3 基 4 FFT 算法	144
3.5 分裂基 FFT 算法	147
3.6 FFT 应用举例	155
3.6.1 序列线性卷积的计算	156
3.6.2 利用 FFT 对信号作频谱分析	158
习题	161
第 4 章 变换域中的 LTI 离散时间系统	162
4.1 有限维 LTI 离散时间系统	162
4.2 频率响应	163
4.2.1 定义	163
4.2.2 稳态响应	165
4.2.3 因果指数序列的响应	166
4.2.4 滤波	168
4.2.5 相位和组延迟	169
4.3 系统函数(转换函数)	171
4.3.1 定义	172
4.3.2 系统函数其他表示	172
4.3.3 通过系统函数得到频率响应	173
4.3.4 频率响应的几何解释	175
4.3.5 极点分布的稳定性条件	176
4.4 系统函数的分类	179
4.4.1 理想滤波器	179
4.4.2 零相位和线性相位系统函数	181
4.4.3 线性相 FIR 系统函数的类型	182
4.4.4 线性相 FIR 系统函数的零点位置	186
4.4.5 有界实系统函数	189
4.5 一些简单的数字滤波器	190

4.5.1	简单 FIR 数字滤波器	190
4.5.2	简单 IIR 数字滤波器	192
4.5.3	梳状(comb)滤波器	199
4.6	全通系统函数	201
4.6.1	定义	202
4.6.2	全通系统的特性	204
4.6.3	全通系统的应用	205
4.7	最小相和最大相系统函数	206
	习题	208
第 5 章	数字滤波器的结构	211
5.1	数字滤波器的构成及表示方法	212
5.2	无限长冲激响应滤波器的基本结构	214
5.3	转置定理	223
5.4	有限长冲激响应滤波器的基本结构	224
5.5	数字滤波器的格型结构	230
	习题	243
第 6 章	数字滤波器的设计	245
6.1	预备知识	246
6.1.1	数字滤波器的描述	246
6.1.2	滤波器类型的选择	248
6.1.3	数字滤波器设计的基本方法	250
6.2	IIR 滤波器的双线性变换方法	251
6.3	常用模拟滤波器的设计	255
6.3.1	滤波器的性能描述	256
6.3.2	巴特沃斯(Butterworth)逼近	258
6.3.3	切比雪夫(Chebyshev)逼近	263
6.4	低通 IIR 数字滤波器的设计	268

6.5 高通、带通、带阻 IIR 数字滤波器的设计	275
6.5.1 模拟低通滤波器变换成数字高通滤波器	276
6.5.2 模拟低通滤波器变换成数字带通滤波器	282
6.5.3 模拟低通滤波器变换成数字带阻滤波器	289
6.6 IIR 滤波器的频谱转换	297
6.6.1 数字低通-数字低通	299
6.6.2 数字低通-数字高通	301
6.7 FIR 数字滤波器的窗函数设计法	308
6.7.1 设计原理	309
6.7.2 几种常用的窗函数	315
6.7.3 常用 FIR 滤波器的设计	325
6.7.4 窗函数法计算中的主要问题	333
6.8 FIR 数字滤波器的频率抽样法	334
6.8.1 线性相位的约束	336
6.8.2 频率抽样的两种方法	337
6.8.3 线性相位第一种频率抽样	339
6.8.4 线性相位第二种频率抽样	341
习题	344
参考文献	346
附表 1 巴特沃斯多项式 $s^N + a_{N-1}s^{N-1} + \cdots + a_2s^2 + a_1s + 1$ ($a_0 = a_N = 1$)的系数	347
附表 2 切比雪夫滤波器分母多项式 $s^N + a_{N-1}s^{N-1} + \cdots + a_1s + a_0$ ($a_N = 1$)的系数	348
附表 3 巴特沃斯多项式 $E(s)$ 的根 s_i	350
附表 4 切比雪夫滤波器分母多项式 $E(s)$ 的根 s_i	351

第1章 时域离散信号和系统

信号是传递信息的函数，是信息的载体。所谓信息是指人类对外界事物的感知。人类对信息的表达、获取、传递的能力在不断地进步，从远古时代的手势、烽火、击鼓、旗语等到今天的电报、电话、传真、电视、多媒体网络，人们对信息的表达越来越准确，获取手段越来越广泛，获取方式越来越先进，信息的传递也越来越有效、可靠和迅速。

人们对信息的处理是通过对信号的处理来实现的。通常把对信号进行处理和设备称为系统。如果对信号的处理是通过模拟部件来进行的，则设备被称为模拟系统；如果对信号的处理是通过数字部件进行的，则被称为数字系统。

离散时间系统的研究源远流长。17世纪发展起来的经典数值分析技术奠定了这方面的数学基础。20世纪40、50年代，抽样数据控制技术的研究取得了重大进展。60年代以后，计算机科学的进一步发展与应用标志着离散时间系统的理论研究和实践进入了一个新阶段。1965年，库利（J. W. Cooley）与图基（J. W. Tukey）在前人的基础上发表了计算 Fourier 变换高速算法的文章，这种算法称为快速 Fourier 变换，缩写为 FFT（Fast Fourier Transform）。FFT 算法的出现引起了人们的巨大兴趣，迅速得到了广泛应用。与此同时，集成电路的发展，使得体积小、重量轻、成本低的离散时间系统有可能实现。

在许多应用中，人们逐渐喜欢用离散时间信号处理的方法来处理一个连续的时间信号。为了达到这个目的，连续时间信号通

过周期抽样被转换成一个相应的离散时间信号，经过一些相应的处理，再还原成连续时间信号。以后，我们将提到：在一定条件下（理想条件），一个连续时间信号能无失真地被转换成离散时间信号，同时能被无失真地还原成原始信号。

因此，为了理解数字信号处理的理论和离散时间系统的设计方法，我们有必要了解在时间域中离散时间信号和系统的特性。当然，在以后的章节中我们会知道，通过变换域了解离散时间信号和系统的特性更加方便。

本章中，我们首先讨论在时域中对一组数字作为序列的离散时间信号的表示方法以及其分类方法。然后我们描述了几种基本的离散时间信号或序列，它们在离散信号和离散系统的时域特性表示中占有重要地位。通过对一个或多个序列的一些基本操作可以产生其他序列。后面我们将提到，一个离散时间系统是由一些基本的操作所组成的，以及如何用一个离散时间序列来表示一个连续时间序列。关于在变换域里的表示方法将在后续章节中讨论。

在本章的最后，我们介绍了关于通过一个离散时间系统以及其相应分类方法的系统来处理一个离散时间信号的普遍概念。在这些系统中，线性系统、时不变系统是我们讨论的重点，同时，我们还描述了其他不同形式的时域特性。

1.1 时域离散信号——序列

1.1.1 时域表示方法

信号是传递信息的函数。按信号特点的不同，可以表示成一个或几个独立变量的函数。习惯上我们把一维信号的参量取作时间，则得到以下几种信号的形式：

(1) **连续时间信号** 即在连续时间范围内定义的信号,但其幅度除可以是连续的以外,也可以是离散的.这种信号在一些特定情况下也被称为模拟信号.

(2) **离散时间信号** 即时间为离散变量的信号,就是指独立变量时间被量化了,而幅度仍是连续变化的信号.

(3) **数字信号** 即时间与幅度都被离散量化了的信号.

本章讨论的就是离散时间信号——序列.具体的内容包括如何从连续时间信号得到离散时间信号、序列的运算、性质和一些特殊的序列、离散时间系统及其差分方程、信号的抽取和插值.如图1-1所示.

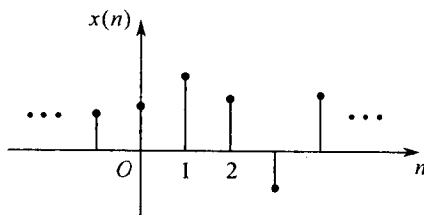


图1-1 离散时间信号

离散时间信号即时间为离散变量的信号.它只在离散时间上给出函数值.在数字信号处理中,信号通常可以被一组称为抽样的数值所表示.一般离散时间信号表示为 $\{x(n)\}$, n 是从 $-\infty$ 到 $+\infty$ 的整数.必须指出 $\{x(n)\}$ 只在 n 为整数时才有意义, n 不是整数时无定义,但不能认为是0.一个具有实数抽样值的离散时间信号给出如下:

$$\{x(n)\} = \{\dots, 0.97, -0.1, 3.16, 1.2, 0.1, -3.67, \\ \quad \quad \quad \uparrow \\ \quad \quad \quad 2.9, -0.8, 6.5, \dots\}. \quad (1-1)$$

箭头“ $\uparrow$ ”表示 $n=0$ 的数据值,它的右边表示 n 为正值,左边表示 n 为负值.如上例:

$$x(0) = -0.1, x(-1) = 0.97, x(1) = 3.16, \dots$$