



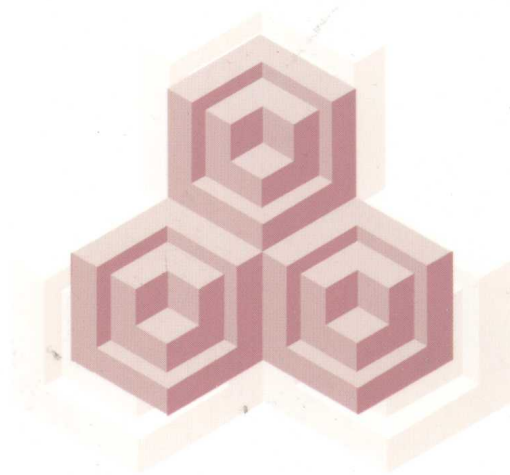
信息通信专业教材系列

数字信号处理基础

SHUZI XINHAO CHULI JICHU

(第2版)

周利清 苏 菲 编著



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

信息通信专业教材系列

数字信号处理基础

(第2版)

周利清 苏 菲 编著

北京邮电大学出版社

·北京·

内 容 简 介

“数字信号处理”是各高等院校电子类专业和通信类专业学生的一门非常重要的专业基础课。本书阐述了离散系统的性质、离散信号的各种变换;深入讲解了DFT的原理及其性质,讨论了用DFT求线性卷积和进行分段卷积的方法;阐述了各种FFT算法;详细论述了IIR数字滤波器的原理和 design 方法;分析了线性相位FIR滤波器的实现条件和重要性质以及设计方法;详细讨论了IIR数字滤波器和FIR数字滤波器的各种结构及其优缺点;讨论了数字信号处理中的有限字长效应。此外,在每一章之后,加入了与本章所涉及的内容有关的Matlab方法、程序、函数等,使读者可以利用Matlab得到的结果来帮助和验证自己对于原理的理解。

全书系统地、深入浅出地、透彻清楚地讲解了数字信号处理的基本理论、基本概念和基本算法,数学推导严谨、逻辑关系清楚,以使得读者便于理解、掌握,并且便于自学。这本书不但可以作为本科生的教材,还可以为从事数字信号处理工作的技术人员自学所用。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理基础/周利清,苏菲编著.—2版.—北京:北京邮电大学出版社,2007(2008.3重印)

ISBN 978-7-5635-1113-6

I.数… II.①周…②苏… 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(2007)第159938号

书 名:数字信号处理基础(第2版)

作 者:周利清 苏 菲

责任编辑:王晓丹

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路10号(100876)

北方营销中心:电话:010-62282185 传真:010-62283578

南方营销中心:电话:010-62282902 传真:010-62282735

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:北京市梦宇印务有限公司

开 本:787mm×960mm 1/16

印 张:24

字 数:523千字

印 数:3001—6000册

版 次:2005年9月第1版 2007年11月第2版 2008年3月第2次印刷

ISBN 978-7-5635-1113-6

定价:36.00元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社营销中心联系 ·

再版说明

2005年9月第一次印刷的《数字信号处理基础》一书共有9章,没有包含多率数字信号处理的内容,也就是说,在这9章中所讨论的数字信号处理都是针对单一的抽样率(即相同的时域抽样周期)而言的。但是,在当前信息技术飞速发展的数字化、信息化时代,对数字信号处理的理论和应用提出了越来越高的要求,常常需要系统处理不同抽样速率的信号。例如,现代数字通信系统需要发送和接收语音、图像、数据等不同类型的信号,这些信号的带宽各不相同,于是抽样率也会各不相同,进而要求系统的工作速率也要与不同速率的信号相匹配。即使对于同一类型的信号,为了改善系统性能,如降低编码速率、提高信道传输容量等,也需要采用多速率处理系统。因此,关于变换信号抽样速率的理论和技术的研究已经越来越重要。考虑到这些需要,本书的这次再版增加了一章,即第10章——“多率数字信号处理”,就是要讨论具有多种抽样率的数字系统即多率数字信号处理系统的有关问题。此外,在与该书配套的《数字信号处理基础习题解答》一书中,也相应地增加了第10章的习题解答。

所增加的第10章的讲解风格、所用的符号、所涉及的基本原理和基本概念等都是与前面9章一脉相承的,希望所增加的内容能够给广大读者带来更多的帮助。

前 言

“数字信号处理”是各高等院校电子类专业和通信类专业学生的一门非常重要的专业基础课,它在现代信息社会中的应用之广以及在各个专业领域中的重要性已经不需要笔者在这里细说了。然而,笔者在与许多本科生和研究生的接触中发现,他们对于数字信号处理方面的知识掌握得并不是太好,而且普遍感到这门课程比较难学。的确,“数字信号处理”这门课程有一定难度,因为这门课最初是一门研究生课程,从20世纪90年代以来,高等院校的有关专业才逐渐将其作为本科生的必修课;另外,掌握这门课要求读者已经较好地学习了“高等数学”、“线性代数”、“复变函数”、“信号与系统”等课程,并且具有一些计算机方面的基本知识;再有就是这门课程所涵盖的知识较丰富,并且随着现代科学技术的飞速发展,数字信号处理所包含的内容还处在不断发展和更新的进程之中。

一本面向本科生的好的教材,应该对数字信号处理的基本理论、基本概念和基本计算方法能够深入浅出、透彻清楚地进行讲解,以使得读者能够看得明白、学得懂,并且能够理解、掌握。这样的教材将使得大多数读者不会感到学习数字信号处理是一件困难的事情。这本书正是按照这样的宗旨来编写的。该书只包含本科生应该掌握的数字信号处理的基本知识,作者力求在对数字信号处理的基本原理、基本概念、基本算法融会贯通、深入理解的基础上,将这些知识系统地、深入浅出地、透彻清楚地讲解出来,做到有理、有据、有条理,数学推导正确,逻辑关系清楚,使读者看得明白、容易理解,并且能够在掌握这些基本知识的基础上,进一步去学习数字信号处理的其他更深入的内容,或者能够将这些知识投入实际应用。因此,出版这样一本教材是一件十分重要而且非常有意义的工作。

这本书是在笔者长期从事数字信号处理方面的教学和科研工作的基础上,为电子和通信类专业的本科生而精心编写的。近几年,笔者已经编写或者翻译了几本关于数字信号处理的书。笔者主笔的2002年版的《数字信号处理基础》一书,基本上是按照上述宗旨编写的。这次改版的《数字信号处理基础》,修订了原书的不足之处,对一些难点问题作了更深入详细的讲解,以使读者更容易理解和掌握;同时,在全书的编排上作了一些调整,使得整本书逻辑性、系统性更强;此外,本书在原来的基础上增加了许多例题及其讲解,也增加了一些习题,以帮助读者更好地理解基本概念和掌握基本算法。

本书还增加了Matlab方面的内容。Matlab是数字信号处理的非常重要的工具,Matlab中所包含的各种函数可以为数字信号处理的各项内容快捷、方便地提供正确的答案和直观的图形显示。但是,目前许多学校为“数字信号处理”这门课提供的学时都不多,而且有不少学生在学这门课之前都没有学过Matlab。因此,如果在有限的学时内,花许多时

间去讲授 Matlab,势必会减少对于基本原理、基本概念和基本方法的讲解;尤其是,那种认为不需要弄明白基本原理、基本概念和基本方法只需要会用 Matlab 工具就可以掌握数字信号处理的想法是完全错误的。因此,本书的写作理念是,以理论讲解为主,在每一章之后,加入与本章所涉及的内容相关的 Matlab 方法、程序、函数等,使读者既掌握原理又会使用 Matlab 工具,而且可以利用 Matlab 得到的结果来帮助和验证自己对于原理的理解。此外,如果学时确实不够,也可以不讲解 Matlab 部分,实际上,读者如果理解了原理、概念和方法,又掌握了 Matlab 工具,那么,他自己完全可以通过自学来掌握每章之后的 Matlab 部分。

本书删去了原书中的第 9 章(离散随机信号及其谱估计)和第 10 章(数字信号处理器简介)。读者如果对离散随机信号的处理感兴趣,可以在有关的专门书籍中找到详细的讲解;如果希望掌握 DSP,则可以去学习有关的专门资料,因为在这本书中不可能具体讲解这些内容。

本书除了上述的这些特点之外,还有一个非常重要的特色:数字信号处理中有几个在理论上和实际应用中都非常重要的基本概念,长期以来都没有找到明确的答案,笔者在多年的数字信号处理的教学和科研中,在与学生们的共同探讨中,总结出了对于这些难题的明确的回答。这些问题包括:1. 留数法求 z 反变换的有关问题;2. 对于用重叠保留法进行分段卷积的原理的深层理解;3. 利用模拟滤波特性的逼近来设计 IIR 数字滤波器时,数字滤波器的数字频率、模拟频率以及模拟滤波器的频率之间的关系;4. 用窗口法设计线性相位因果 FIR 滤波器时,当长度 N 为偶数时应该如何处理。这些问题在本书中都有透彻的分析和明确的结果。

关于本书的内容和结构大致是这样安排的:离散系统的理论与离散信号的变换是数字信号处理的基础,以此作为第一部分;FFT 算法和数字滤波是数字信号处理的两大基本方法,它们分别作为第二和第三部分,这两部分占据了全书的主要篇幅;第四部分是数字信号处理中的字长效应。为了使全书内容紧凑并且更具有逻辑性和系统性,本书所用到的、在“信号与系统”中已经学过的一些重要的数学公式和结论,以及一些较长的又不影响主要内容的推导过程和证明过程等都放在附录之中。

以上所述是本书的宗旨、内容、特色,所涉及的一些观点只是笔者自己的看法,如有不当之处,欢迎批评指正;本书的具体内容中如有不当或者错误的地方,也欢迎批评指正。

我们还将尽快出版与各章后的习题配套的习题解答集。此外,在本书出版的同时还将推出其电子教材。

周利清

2005 年 3 月

目 录

第一部分 离散信号和离散系统基础

第 1 章 数字信号处理概述	3
1.1 信号的分类	3
1.2 数字信号处理	4
1.3 数字信号处理的优越性	4
1.4 数字信号处理的 3 种方式	6
1.5 数字信号处理的两大方法	6
第 2 章 离散系统的性质和离散信号的变换	7
2.1 抽样和内插	7
2.1.1 抽样	7
2.1.2 内插	12
2.2 离散时间信号	15
2.2.1 离散时间信号序列	15
2.2.2 常用序列	16
2.3 离散系统及其线性和时不变性	18
2.3.1 离散系统的定义及其单位抽样响应	18
2.3.2 离散系统的线性	19
2.3.3 离散系统的时不变性	20
2.3.4 线性时不变系统	21
2.4 离散信号的线性卷积	21
2.4.1 离散线性卷积的定义	21
2.4.2 离散线性卷积的计算	22
2.5 离散系统的因果性和稳定性	24
2.5.1 因果性	24
2.5.2 稳定性	25

2.6 离散信号的傅里叶变换	26
2.6.1 问题的提出	26
2.6.2 傅里叶变换对的推导	27
2.6.3 离散信号傅里叶变换的性质	29
2.6.4 线性时不变系统的频率响应	31
2.7 离散信号的 z 变换	32
2.7.1 z 变换的定义及其收敛域	32
2.7.2 z 变换的性质	34
2.7.3 z 反变换	38
2.7.4 z 变换与傅里叶变换的关系	46
2.8 离散系统的差分方程、系统函数及其零极点	48
2.8.1 离散系统的差分方程	48
2.8.2 离散系统的系统函数	49
2.8.3 系统函数的零极点	50
2.8.4 线性时不变因果系统的稳定性	52
2.9 Matlab 方法	54
2.9.1 常用序列及序列运算的 Matlab 实现	54
2.9.2 离散信号变换的 Matlab 实现	58
习 题	64

第二部分 快速傅里叶变换

第3章 离散傅里叶变换	69
3.1 离散傅里叶级数及其性质	69
3.1.1 周期序列 DFS 的推导	69
3.1.2 DFS 的性质	74
3.2 离散傅里叶变换及其性质	80
3.2.1 DFT 的导出	80
3.2.2 DFT 的性质	81
3.3 z 变换与 DFT 的关系	88
3.3.1 由 z 变换得到 DFT	88
3.3.2 由 DFT 得到 z 变换	89
3.3.3 频率分辨率	89

3.4 用 DFT 求线性卷积	90
3.4.1 循环卷积与线性卷积的关系	90
3.4.2 用 DFT 求线性卷积	93
3.5 分段卷积	94
3.5.1 重叠相加法	94
3.5.2 重叠保留法	97
3.6 Matlab 方法	99
3.6.1 利用 Matlab 计算信号的 DFT 和 IDFT	99
3.6.2 序列循环移位的 Matlab 实现	101
3.6.3 循环卷积的 Matlab 实现	103
3.6.4 利用 DFT 计算线性卷积的 Matlab 实现	103
3.6.5 分段卷积的 Matlab 实现	105
习题	108
第 4 章 快速傅里叶变换	112
4.1 引言	112
4.1.1 DFT 的矩阵表示及其运算量	112
4.1.2 W_N^k 因子的特性	113
4.2 基 2 时间抽选的 FFT 算法	114
4.2.1 算法推导	114
4.2.2 算法特点	117
4.2.3 关于 FFT 算法的计算机程序	118
4.3 基 2 频率抽选的 FFT 算法	120
* 4.4 基 4 时间抽选的 FFT 算法	123
4.5 快速傅里叶反变换	126
* 4.6 线性调频 z 变换算法	128
4.6.1 基本原理	128
4.6.2 算法的要点	130
4.6.3 算法的特点	132
4.7 实序列的 FFT 的高效算法	134
4.7.1 两个长度相同的实序列	134
4.7.2 一个 $2N$ 点的实序列	136
4.8 Matlab 方法	136
4.8.1 利用 Matlab 计算 FFT	136

4.8.2 用 Matlab 实现有限长序列的 Chirp z 变换	136
习题	141

第三部分 数字滤波

第 5 章 数字滤波概述	147
5.1 数字滤波器与模拟滤波器	147
5.2 两大类数字滤波器	147
5.3 数字滤波器的设计步骤	148
第 6 章 IIR 数字滤波器的原理及设计	149
6.1 概述	149
6.1.1 IIR 数字滤波器的差分方程和系统函数	149
6.1.2 IIR 数字滤波器的设计方法	149
6.1.3 借助于模拟滤波器的理论和方法的设计原理	150
6.2 模拟低通滤波特性的逼近	151
6.2.1 Butterworth 低通滤波特性的逼近	151
6.2.2 Chebyshev 低通滤波特性的逼近	154
6.2.3 Cauer 低通滤波特性简介	162
6.2.4 3 种滤波器的比较	163
6.2.5 滤波器图表法设计	164
* 6.3 模拟滤波器的变换	166
6.3.1 由模拟低通到模拟高通的变换	166
6.3.2 由模拟低通到模拟带通的变换	167
6.4 冲激响应不变法	171
6.4.1 冲激响应不变法的变换方法	171
6.4.2 模拟滤波器与数字滤波器的频率响应之间的关系	172
6.4.3 z 平面与 s 平面的映射关系	174
6.5 双线性变换法	176
6.5.1 双线性变换关系的导出	176
6.5.2 s 平面与 z 平面的映射关系	179
6.5.3 频率预畸变	179
6.5.4 双线性变换法的特点	180
6.6 数字滤波器的变换	182
* 6.7 IIR 数字滤波器的优化设计	187
6.7.1 误差判别准则	188

6.7.2 关于最优化算法	191
6.8 Matlab 方法	192
6.8.1 利用 Matlab 实现模拟滤波器的设计	192
6.8.2 冲激响应不变法的 Matlab 实现	199
6.8.3 双线性变换法的 Matlab 实现	199
6.8.4 用 Matlab 实现数字滤波器的设计	201
习题	207
第 7 章 FIR 数字滤波器的原理及设计	210
7.1 FIR 数字滤波器的差分方程、冲激响应、系统函数及其零极点	210
7.2 线性相位 FIR 滤波器	211
7.2.1 恒延时滤波	211
7.2.2 线性相位 FIR 滤波器满足的条件	211
7.2.3 线性相位 FIR 滤波器的特性	214
7.3 窗口法	219
7.3.1 基本原理	219
7.3.2 对频率响应的影响	220
7.3.3 常用窗函数	223
7.3.4 设计方法小结	227
* 7.4 频率抽样法	231
* 7.5 FIR 数字滤波器的优化设计	233
7.5.1 切比雪夫等波纹逼近	233
7.5.2 加权切比雪夫逼近问题	234
7.5.3 Remez 交换算法	239
7.6 Matlab 方法	242
7.6.1 用 Matlab 进行基于窗函数的 FIR 数字滤波器的设计	242
7.6.2 用 Matlab 进行等波纹 FIR 滤波器的设计	247
习题	252
第 8 章 数字滤波器的结构	255
8.1 数字网络的信号流图	256
8.1.1 信号流图及其有关概念	256
8.1.2 解代数方程组求节点变量之值	257
8.1.3 化简信号流图求系统函数	259
8.1.4 Mason 公式	261
8.1.5 信号流图的转置	263

8.2 IIR 数字滤波器的结构	264
8.2.1 直接型	264
8.2.2 正准型	267
8.2.3 级联型	268
8.2.4 并联型	270
8.3 FIR 数字滤波器的结构	271
8.3.1 横截型	271
8.3.2 级联型	273
8.3.3 频率抽样型	274
8.4 FIR 数字滤波器与 IIR 数字滤波器的比较	278
8.5 用 Matlab 实现数字滤波器的结构	279
8.5.1 IIR 数字滤波器的结构实现	279
8.5.2 FIR 数字滤波器的结构实现	282
习题	285

第四部分 有限字长效应及多率处理

第 9 章 数字信号处理中的有限字长效应	291
9.1 概述	291
9.1.1 数字系统与有限字长效应	291
9.1.2 关于数的表示	292
9.1.3 量化误差	292
9.2 A/D 变换的字长效应	293
9.2.1 量化效应的统计分析	293
9.2.2 线性时不变系统对量化噪声的响应	294
9.3 乘积误差的影响	295
9.3.1 IIR 滤波器中乘积误差的影响	295
9.3.2 FIR 滤波器中乘积误差的影响	301
9.4 系数的量化效应	302
9.5 极限环振荡	304
习题	306
第 10 章 多率数字信号处理	309
10.1 概述	309
10.2 抽样率变换的原理和方法	309
10.2.1 按整数因子 M 抽取	310

10.2.2 按整数因子 L 内插	312
10.2.3 按分数因子变换抽样率	314
10.3 多率数字系统中的滤波器的实现	317
10.3.1 直接型 FIR 结构的高效实现	317
10.3.2 多相滤波器结构	320
10.4 多率数字滤波器组	325
10.4.1 数字滤波器组	325
10.4.2 分析滤波器组	326
10.4.3 综合滤波器组	328
10.4.4 子带变换系统	330
10.5 正交镜像滤波器(QMF)组	330
10.5.1 二通道 QMF 组	330
10.5.2 二通道 QMF 组的实现	333
10.6 子带编码	334
10.6.1 树形结构的 SBC	334
10.6.2 并行结构的 SBC	336
10.7 Matlab 方法	338
10.7.1 抽取和内插的 Matlab 实现	338
10.7.2 多率数字系统中滤波器的 Matlab 实现	345
习 题	351

附 录

A1 常用的数学知识	357
A1.1 傅里叶变换	357
A1.2 特殊函数	358
A2 LTI 系统因果性的充分必要条件的证明	362
A3 复变函数中的一个积分的计算	364
A4 双线性变换法 s 平面与 z 平面的映射关系推导	365
A5 常用的名词和术语以及英文缩写词一览表	367
参 考 文 献	369

注:目录中有“*”号的是选学的内容。

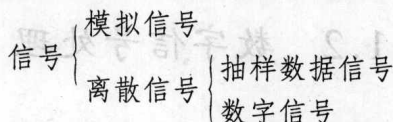
第一部分

离散信号和离散系统基础

第1章 数字信号处理概述

1.1 信号的分类

电信号可以用它随时间变化的电压大小来表示,也可以用它随时间变化的电流大小来表示,无论是用电压还是电流来表示,都可以这样来分类:



模拟信号(的电压或者电流)是时间的连续函数,在规定的时间内的任意时刻信号都有一定的数值(幅值),而且此数值是在一定的范围内随时间连续变化的。例如脉冲信号、三角形信号、正弦信号、语音信号等都是模拟信号,如图 1.1 所示。

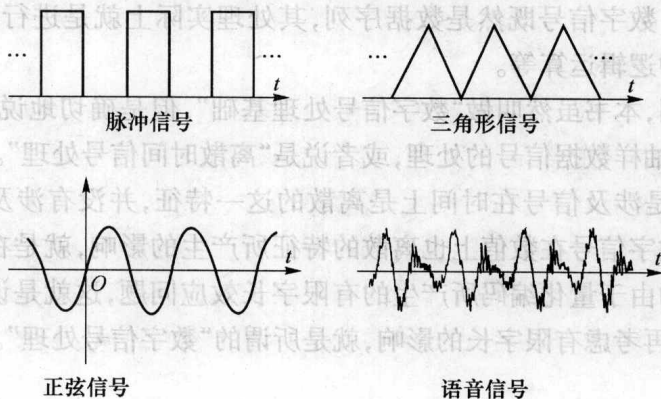


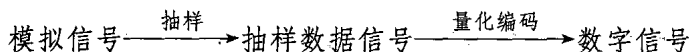
图 1.1 模拟信号

离散信号只在一组特定的时刻有数值,在其他时间数值为零,因此离散信号又叫离散时间信号。若离散信号的幅值在一定范围内可连续取值,则为抽样数据信号;将抽样数据信号的幅值量化并变为二进制数码序列,则为数字信号。因此,抽样数据信号在时间上是离散的,而其幅值是可以连续变化的;而数字信号在时间上是离散的,其幅值也不能够连

续变化。

例如一个模拟信号,如图 1.1 中所示的正弦信号,假设它可以表示为函数 $f(t) = 8\sin \Omega_0 t$,显然, $f(t)$ 不仅是时间的连续函数,而且其幅值的大小也是在一定的范围内(8 与 -8 之间)连续变化的。如果对此信号进行抽样,也即每隔一定的时间间隔抽取一数值,则得到一个数据序列,此时的信号在时间上是离散的,但其幅值大小仍可以在 8 和 -8 之间任意取值,这就是抽样数据信号。抽样数据信号又叫做抽样信号或取样信号或采样信号。如果对抽样信号进行量化编码,比如采用 4 bit 线性编码来处理上述抽样信号,即每个样值用 4 位二进制码表示,则其取值只能为 7, 6, $\dots$, 1, 0, -1, $\dots$, -8, 这就是数字信号。也就是说,数字信号在时间上和数值上都是离散的。

综上所述,有:



1.2 数字信号处理

数字信号处理是研究如何用数字或符号序列来表示信号以及如何对这些序列进行处理的一门学科。大家知道,模拟信号的特征是用波形来描述的,而离散信号实际上是一串数据,是一个数字序列,这是它与模拟信号的根本区别,因此,对数字信号的处理肯定与模拟信号处理不同。数字信号既然是数据序列,其处理实际上就是进行各种数学运算,如加、减、乘以及各种逻辑运算等。

这里应该说明,本书虽然叫做“数字信号处理基础”,但是确切地说,实际上在第四部分之前,讲的都是抽样数据信号的处理,或者说是“离散时间信号处理”。因为在第四部分之前的内容,都只是涉及信号在时间上是离散的这一特征,并没有涉及数值上离散的特征。至于真正的数字信号在数值上也离散的特征所产生的影响,就是在第四部分或者说第 9 章中所讨论的由于量化编码所产生的有限字长效应问题,这就是说,在“离散时间信号处理”的基础上再考虑有限字长的影响,就是所谓的“数字信号处理”。

1.3 数字信号处理的优越性

对信号进行数字处理与进行模拟处理相比较,有以下一些优越性。

1. 精度高

对模拟信号的处理,是用由电感、电容、电阻等元件所组成的模拟系统来实现的,而模