



普通高等教育“十一五”规划教材

数字信号处理

史 林 赵树杰 编著



科学出版社
www.sciencep.com



中国大学计算机专业主干课程教材

数字信号处理

主 编 赵树文 副编

清华大学出版社
Tsinghua University Press

TN911.72/191

2007

普通高等教育“十一五”规划教材

数字信号处理

史 林 赵树杰 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书系统讲述了数字信号处理的基本原理、分析方法和处理技术。全书内容由五部分组成:信号和信号处理概论及模拟信号的数字化处理方法;离散时间信号——序列与离散时间系统的基本概念和时域、频域分析;序列离散傅里叶变换的概念、性质和应用及其快速算法;数字滤波器的基本概念与理论,数字滤波器的设计、算法结构和误差分析;多采样速率数字信号处理的基本理论、高效算法结构和应用举例。书中结合各章的重点内容,列举典型例子介绍相应的 Matlab 信号处理工具箱函数,并给出用 Matlab 阐述问题和求解计算或设计的程序及结果。各章配有理论练习题和 Matlab 上机实验题。

本书可作为普通高等学校工科电子信息工程、通信工程、智能信息处理、生物医学工程、自动化、测控技术与仪器、电子科学与技术专业以及理科电子信息科学与技术等电子信息类专业本科生的教材,也可供从事信号与信息处理的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/史林,赵树杰编著. —北京:科学出版社,2007
(普通高等教育“十一五”规划教材)
ISBN 978-7-03-020108-9

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 146641 号

责任编辑:匡 敏 余 江 潘继敏 / 责任校对:钟 洋
责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市文林印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 9 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 9 月第一次印刷 印张:28 1/2

印数:1—3 500

字数:540 000

定价:35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈文林〉)

前 言

数字信号处理是高等院校电子信息类专业的一门必修课程。随着电子信息科学技术和计算机科学技术及大规模、超大规模集成电路的迅速发展与广泛应用,数字信号处理的理论、算法和处理技术也得到飞速发展,应用的领域和范围日益扩大。为了满足教学中对数字信号处理教材的需求,同时教材中应反映数字信号处理的新理论、新算法和新的处理技术,编者在参考国内外同类教材的基础上,结合多年教学经验,并吸取了部分科研成果,编著了这本书。

本书在编写过程中力求做到以下几点:

(1) 内容选择合适,章节安排得当,重点内容突出,便于教和学。数字信号处理的先修课程是信号与系统,而后续课程是离散时间随机信号处理、现代信号处理等。所以,在内容的选择上既要保持课程的完整性,又要考虑前后课程的不同教学大纲的要求,力求做到取舍合适;各章节的前后次序和具体内容安排,力求做到合理、完整、系统,重点内容突出,方便教学和学习。

(2) 突出基本原理,强调基本概念,重视基本分析方法,注意理论联系实际。数字信号处理是一门理论性和实践性都很强的课程,因此,在讨论离散时间信号和系统的时域、频域特性,序列的离散傅里叶变换,多采样速率信号处理等问题时,重点论述它们的基本原理,明确其物理意义,掌握其主要性质;在讨论离散傅里叶变换的快速算法时,重点说明各种算法的基础和基本思想与具体方法;在讨论数字滤波器的设计和算法结构及误差分析等问题时,主要论述设计指标、设计原理和设计方法,各种可能的算法结构及其主要优缺点,有限字长的误差分析等。书中对数字信号处理的典型应用——用 DFT 对信号进行频谱分析,用 DFT 计算两序列的线性卷积,数字下变频信号处理等做了详细介绍。

(3) 适量补充新内容。数字信号处理的理论和技术不断向前发展,适量补充比较成熟的、通用性较强的新理论和技术是必要的。本书对多采样速率信号处理的基本原理、采样率转换系统的实现方法和高效结构进行了讨论,并介绍了它在模拟/数字变换、数字接收机设计、音频信号处理等方面的应用;对格型滤波器也做了适量的讨论。根据教学大纲要求,离散时间随机信号处理的内容不包含在本书内。

(4) 将数字信号处理的理论和算法、数字滤波器的设计和结构与 Matlab 语言很好地结合,提高效率,方便分析和设计。Matlab 信号处理工具箱函数,可用于数字信号和系统的性能分析研究、数值计算,数字滤波器的算法结构设计和参数计算等方面。本书的各章中,分别介绍了有关的 Matlab 信号处理工具箱函数,并结合

例题说明其应用。

(5) 将例题、理论练习题和 Matlab 上机实验题合理搭配,有机结合。书中的重点内容部分均有相应的例题;各章末也配有较丰富的理论练习题和 Matlab 上机实验题,其中有些题目是以实际应用问题为基础编写而成的。读者在学习数字信号处理基本理论的基础上,最好能选做一些理论练习题,并用 Matlab 语言在计算机上进行问题的分析和求解,或系统参数的计算与设计。

本书共分 9 章。第 1 章概述了信号和信号处理的基本概念、数字信号处理的特点;还讨论了模拟信号的数字处理方法,导出了时域采样定理。第 2 章讨论离散时间信号和系统的时域分析。重点讨论了离散时间信号——序列的基本概念、典型序列、序列表示和序列运算,离散时间系统的线性和时不变性,线性时不变系统的单位脉冲响应,输入序列输出序列间的线性卷积关系,用系统参数来描述系统特性的线性常系数差分方程及其求解。第 3 章讨论离散时间信号和系统的频域分析。重点讨论了序列的离散时间傅里叶变换的定义、概念和性质,序列的 Z 变换的定义、收敛域和性质及其与序列的离散时间傅里叶变换的关系,离散时间线性时不变性系统的系统函数、零极点分布、因果性和稳定性及系统的特性。第 4 章讨论有限长序列的离散傅里叶变换。重点讨论了序列的离散傅里叶变换的定义、概念和性质,及其与序列的离散时间傅里叶变换和序列的 Z 变换之间的关系;还讨论了序列离散傅里叶变换的主要应用。第 5 章讨论有限长序列的离散傅里叶变换的快速算法。在分析减少运算量途径的基础上,重点讨论了时域抽取基 2FFT 算法和频域抽取基 2FFT 算法,给出了蝶形运算结构,分析了该算法的特点和运算量;还讨论了离散傅里叶逆变换的快速算法问题。第 6 章讨论无限长单位脉冲响应数字滤波器的设计。在说明滤波器主要指标含义的基础上,讨论了常用几种模拟滤波器的设计;重点讨论了由模拟滤波器转换成数字滤波器的脉冲响应不变法和双线性变换法的基本原理、变换关系、映射分析及各自的优缺点;还讨论了数字域的频带变换问题;无限长脉冲响应数字滤波器的优化设计是本章的另一个重点问题。第 7 章讨论有限长脉冲响应数字滤波器设计。首先说明了线性相位滤波器的概念及条件;然后重点讨论了窗函数设计法、频率采样设计法和等波纹最佳逼近设计法的基本原理、设计方法及各自的优缺点。第 8 章讨论数字滤波器的算法结构与误差分析。首先讨论了无限长脉冲响应数字滤波器的直接型、级联型和并联型算法结构及有限长脉冲响应数字滤波器的直接型、级联型和频率采样型算法结构;然后讨论了信号量化、滤波器系数量化的有限字长效应问题。第 9 章讨论多速率数字信号处理。讨论了整数倍抽取、内插的概念,抽取、内插滤波系统的实现方法和高效算法结构,并举例说明其应用。

本门课的先修课程是信号与系统、Matlab 语言等,教学参考学时为 60 学时。如果安排 46 学时,那么有关 Matlab 的内容(书中的小字体部分)、第 6 章关于模拟

滤波器设计的内容可以简略,第9章不讲。

本书由史林和赵树杰共同编写。刘昕雨、曹哲、薛媛等13名研究生参加了本书的计算机文字录入,绘制了部分图表,对他们的工作和付出在此表示深深的感谢。

本书在编写过程中,参考了国内外有关的参考文献资料,参照了部分内容的写法,采用了其中的一些例题和练习题。在此向所有参考文献的作者表示诚挚的感谢。

本书的出版得到科学出版社匡敏、余江等编辑的大力支持,他们为本书做了大量细致的工作,在此深表感谢。

由于作者水平有限,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。

作者联系电话:(029)88201997,E-mail:lshi61@163.com。

作 者

于西安电子科技大学

目 录

前言

第 1 章 信号和信号处理	1
1.1 引言	1
1.2 信号及其分类	1
1.3 信号处理的基本概念	2
1.4 数字信号处理的实现方法	3
1.5 数字信号处理的主要特点	4
1.6 模拟信号的数字处理方法	5
1.6.1 模拟信号的数字处理原理框图	5
1.6.2 采样定理	6
1.6.3 采样内插恢复	9
1.7 习题	11
第 2 章 离散时间信号和系统的时域分析	15
2.1 引言	15
2.2 离散时间信号——序列	15
2.2.1 常用的典型序列	15
2.2.2 任意序列的表示	19
2.2.3 序列的基本运算	20
2.3 离散时间系统	23
2.3.1 线性系统	24
2.3.2 时不变系统	25
2.4 离散时间 LTI 系统的时域分析	26
2.4.1 系统的单位脉冲响应	26
2.4.2 系统输出与输入之间的关系	26
2.4.3 系统的因果性和稳定性	30
2.4.4 数字滤波器的分类	34
2.5 离散时间 LTI 系统的差分方程描述	35

2.5.1 线性常系数差分方程	35
2.5.2 线性常系数差分方程的求解	35
2.6 习题	40
第3章 离散时间信号和系统的频域分析	47
3.1 引言	47
3.2 序列的离散时间傅里叶变换	47
3.2.1 序列的离散时间傅里叶变换的定义	47
3.2.2 序列的离散时间傅里叶变换的性质	49
3.3 基本序列的离散时间傅里叶变换	57
3.3.1 基本序列离散时间傅里叶变换的求解	57
3.3.2 基本序列离散时间傅里叶变换的列表	60
3.4 序列的 Z 变换	60
3.4.1 序列的 Z 变换的定义及收敛域	61
3.4.2 序列特性与收敛域的关系	62
3.4.3 常见序列的 Z 变换	65
3.4.4 序列的 Z 变换与 DFT 的关系	66
3.4.5 逆 Z 变换	67
3.4.6 Z 变换的性质和定理	74
3.5 离散时间 LTI 系统的频域分析	82
3.5.1 差分方程的 Z 变换解	82
3.5.2 离散时间 LTI 系统的频率响应	83
3.5.3 余弦型信号通过离散时间 LTI 系统的响应	86
3.5.4 离散时间 LTI 系统的稳态响应和暂态响应	87
3.5.5 离散时间 LTI 系统的相位延迟和群延迟	87
3.6 离散时间 LTI 系统的 z 域分析	89
3.6.1 离散时间 LTI 系统的系统函数	89
3.6.2 离散时间 LTI 系统的差分方程与系统函数	89
3.6.3 系统函数的极点分布与系统因果性和稳定性的关系	90
3.6.4 系统函数的零极点分布对系统频率响应特性的影响	92
3.7 梳状滤波器、全通滤波器和最小相位系统	96
3.7.1 梳状滤波器	96

3.7.2 全通滤波器	98
3.7.3 最小相位系统	100
3.8 习题	102
第4章 离散傅里叶变换	111
4.1 引言	111
4.2 周期序列的离散傅里叶级数及性质	111
4.2.1 周期序列的离散傅里叶级数	111
4.2.2 DFS的性质	113
4.3 离散傅里叶变换	116
4.3.1 离散傅里叶变换的定义	117
4.3.2 离散傅里叶变换的矩阵表示	118
4.3.3 离散傅里叶变换与Z变换及离散时间傅里叶变换之间的关系	119
4.4 离散傅里叶变换的隐含周期性和性质	124
4.4.1 离散傅里叶变换的隐含周期性	124
4.4.2 离散傅里叶变换的性质和定理	125
4.4.3 离散傅里叶变换性质列表	136
4.5 离散傅里叶变换的应用	137
4.5.1 利用DFT计算序列的线性卷积	137
4.5.2 利用DFT对连续时间信号进行频谱分析	143
4.5.3 利用DFT对序列进行频谱分析	152
4.5.4 利用DFT对周期性序列进行频谱分析	157
4.6 习题	157
第5章 快速离散傅里叶变换	164
5.1 引言	164
5.2 基2FFT算法	164
5.2.1 直接计算DFT的运算量及减少运算量的基本途径	164
5.2.2 时域抽取基2FFT算法	165
5.2.3 频域抽取基2FFT算法	173
5.2.4 变形基2FFT运算流程图	176
5.3 IDFT的快速算法	177
5.3.1 旋转因子指数变极性法	178

5.3.2 直接调用 FFT 子程序法	178
5.4 基 4FFT 算法	179
5.5 实序列的 FFT 算法	185
5.5.1 利用复序列的 FFT 计算实序列的 FFT	185
5.5.2 离散哈特莱变换及其快速算法	186
5.6 习题	194
第 6 章 无限长单位脉冲响应数字滤波器的设计	197
6.1 引言	197
6.2 数字滤波器设计概述	197
6.3 模拟滤波器的设计	200
6.3.1 巴特沃思模拟低通滤波器	201
6.3.2 切比雪夫模拟低通滤波器	208
6.3.3 椭圆模拟低通滤波器	217
6.3.4 贝塞尔模拟低通滤波器	222
6.4 模拟滤波器的频带变换	223
6.4.1 原型低通到低通的频带变换	224
6.4.2 原型低通到高通的频带变换	224
6.4.3 原型低通到带通的频带变换	227
6.4.4 原型低通到带阻的频带变换	231
6.5 用脉冲响应不变法设计 IIR 数字滤波器	234
6.5.1 基本原理	234
6.5.2 s 平面与 z 平面之间的映射关系	235
6.5.3 设计方法	237
6.6 用双线性变换法设计 IIR 数字滤波器	241
6.6.1 基本原理	241
6.6.2 s 平面与 z 平面之间的映射关系	243
6.6.3 设计方法	245
6.7 数字滤波器的频带变换	249
6.7.1 数字低通到数字低通的频带变换	251
6.7.2 数字低通到数字高通的频带变换	252
6.7.3 数字低通到数字带通的频带变换	253

6.7.4 数字低通到数字带阻的频带变换	254
6.8 用 Matlab 设计数字滤波器	255
6.9 IIR 数字滤波器的直接设计方法	261
6.9.1 零极点累试法	261
6.9.2 频域幅度误差平方最小法	262
6.9.3 时域逼近法和最小二乘法	265
6.10 习题	267
第 7 章 有限长脉冲响应数字滤波器设计	273
7.1 引言	273
7.2 线性相位 FIR 数字滤波器及其特点	273
7.2.1 线性相位 FIR 数字滤波器	273
7.2.2 线性相位的条件	274
7.2.3 线性相位 FIR 数字滤波器的幅度特性	277
7.2.4 线性相位 FIR 数字滤波器的零点分布	282
7.3 FIR 数字滤波器的窗函数设计法	283
7.3.1 窗函数设计法的基本原理	283
7.3.2 矩形窗函数所设计滤波器的性能分析	284
7.3.3 典型窗函数及其特性	288
7.3.4 窗函数法设计 FIR 数字滤波器步骤	296
7.4 FIR 数字滤波器的频率采样设计法	300
7.4.1 频率采样设计法的基本原理	301
7.4.2 频率采样设计法的逼近误差分析	303
7.4.3 频率采样设计法的改进措施	305
7.4.4 频率采样法的设计步骤	306
7.5 FIR 数字滤波器最优化设计	308
7.5.1 FIR 数字滤波器最优化设计准则	308
7.5.2 等波纹最佳逼近法的设计思想	309
7.5.3 remez 和 remezord 函数的功能和调用	312
7.6 习题	316
第 8 章 数字滤波器的算法结构与误差分析	322
8.1 引言	322

8.2 信号流图	323
8.3 无限长脉冲响应数字滤波器的算法结构	325
8.3.1 直接型结构	326
8.3.2 级联型结构	327
8.3.3 并联型结构	329
8.3.4 转置型结构	330
8.4 有限长脉冲响应数字滤波器的算法结构	331
8.4.1 直接型结构	331
8.4.2 级联型结构	332
8.4.3 线性相位结构	333
8.4.4 频率采样结构	334
8.4.5 快速卷积结构	339
8.5 数字滤波器的格型结构	339
8.5.1 全零点滤波器的格型结构	340
8.5.2 全极点滤波器的格型结构	345
8.5.3 具有零点和极点滤波器的格梯型结构	348
8.6 利用 Matlab 进行数字滤波器算法结构的转换	352
8.6.1 由直接型转换为级联型	352
8.6.2 并联型结构	354
8.6.3 频率采样型结构	357
8.6.4 格型结构	359
8.7 数字信号处理中的误差分析	361
8.7.1 二进制数的表示	362
8.7.2 量化及量化误差分析	363
8.7.3 A/D 变换的量化误差	367
8.7.4 量化噪声通过线性系统的响应	368
8.7.5 数字系统中的系数量化效应	370
8.7.6 数字信号处理中有限字长运算的量化效应	375
8.8 习题	388
第 9 章 多速率数字信号处理	397
9.1 引言	397

9.2 信号的抽取	397
9.2.1 整数 M 倍信号抽取的运算	397
9.2.2 信号抽取的变换域描述	398
9.2.3 抗混叠整数倍信号抽取	401
9.3 信号的内插	403
9.3.1 整数 L 倍信号内插的运算	403
9.3.2 信号内插的变换域描述	404
9.4 信号采样速率的有理数转换	406
9.5 采样频率转换系统的 FIR 滤波器算法结构	408
9.5.1 采样速率转换系统的直接型 FIR 滤波器算法结构	408
9.5.2 采样速率转换系统的多级实现	412
9.6 采样速率转换系统的多相滤波器算法结构	418
9.6.1 多速率信号处理系统的多相分解表示	418
9.6.2 抽取和内插系统的多相滤波器算法结构	420
9.7 采样速率转换系统的 Matlab 实现	421
9.8 多采样速率转换应用举例	424
9.8.1 数字下变频的传统实现方法	425
9.8.2 直接中频采样的数字下变频技术	426
9.9 过采样技术	435
9.9.1 A/D 变换器中的过采样技术	436
9.9.2 D/A 变换器中的过采样技术	437
9.10 习题	437
参考文献	441

第 1 章 信号和信号处理

1.1 引言

自然界中充满了各种信号,从这些信号中提取尽可能多的对人类有用的信息,是现代信息技术始终追求且永无止境的目标,它推动了信号处理学科的发展。特别是近三十多年来,高速度、高精度的数字信号处理已经形成了一套完备的理论体系,其中包括各种快速的和优良的算法。而且随着新理论和新算法的提出,计算机技术、超大规模集成电路技术等的高速发展,数字信号处理的理论和技术还在不断地丰富、完善和提高。

本章主要讨论信号及其分类、信号处理的基本概念、实现方法和数字信号处理的特点,模拟信号的数字处理方法等内容。

1.2 信号及其分类

信号是信息的载体,任何携带信息的物理量都可以称为信号。在社会科学、自然科学和人们的日常生活中会遇到各种各样的信号,其中有的是客观存在的,有的则是人类有目的制造的;有的信号是有用的,有的则是不需要的,甚至是有害的。虽然有不同类型的信号,但一般来说,信号都可以表示为独立自变量的函数。函数的自变量可以是时间、坐标、温度、压力等,而特定自变量所对应的函数值可以理解为信号的幅度值。

有多种方法对信号进行分类。下面介绍几种主要的信号分类方法。

(1) 按信号载体的物理特性,信号可分为:电、光、声、磁、机械、热等信号。一些社会科学研究的信号则以统计数据为载体,例如,一个国家的人口素质是基于人口数量、男女比例、年龄结构、文化程度、从事职业、健康状况等统计数据得出来的。

(2) 按信号中自变量的数目,信号可分为:

一维信号,如语言和音乐,它们是以时间为自变量的信号。

二维信号,如黑白照片、地形图,它们以 x 、 y 两维坐标为自变量;彩色照片的自变量也是二维坐标,但照片有红、绿、蓝三色。

三维信号,如黑白电视图像,它的三个自变量是 x 、 y 坐标和时间 t ;彩色电视图像也是三个自变量的信号,且图像有三色(如红、绿、蓝)。

类似地,也有四维信号及四维以上信号。

通常,将含有一个自变量的信号称为一维信号,而将含有两个或两个以上自变量的信号称为多维信号。

本书讨论以时间为自变量的一维电信号的处理问题。虽然自变量不一定是时间,信号也不限于电信号,但这样默认便于问题的讨论和理解。一维信号处理也是研究多维信号处理的基础。

(3) 按信号中自变量和幅度的取值特点,信号可分为:

连续时间(continuous-time, CT)信号,其自变量时间在信号的定义域内是连续的。如果连续时间信号的幅度在一定的动态范围内也连续取值,即为模拟量,这样的信号称为模拟信号(analog signal),用 $x_a(t)$ 表示。自然界中的大多数信号是模拟信号。

离散时间(discrete-time, DT)信号,其自变量时间在信号的定义域内是离散的。所以离散时间信号是仅在离散时刻上有定义的信号。离散时间信号可以通过对连续时间信号的采样获得,例如,用周期为 T 的采样脉冲对模拟信号 $x_a(t)$ 进行采样,得离散时间信号

$$x(nT) = x_a(t) \big|_{t=nT}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

也有的信号本身就是离散时间的,如电话交换机单位时间内收到的电话呼叫次数,计算机产生的离散伪随机序列等。

数字信号(digital signal),是时间离散、幅度量化为有限字长二进制数的信号。

离散时间信号的幅度量化为有限字长的二进制数,存在量化误差。本书针对离散时间信号和系统展开论述,量化误差将在误差分析一节中讨论。这样安排的目的是,在阐述数字信号处理的基本概念、基本理论和算法、系统设计等问题时,先避开有限字长的效应,使概念清楚、理论严谨、便于理解和掌握。

1.3 信号处理的基本概念

从信号中提取尽可能多的有用信息,增强信号的有效分量,估计信号的特征参数,识别信号的特性,同时抑制或消除不需要的,甚至有害的信号分量等,是信号处理的根本目的。为此,需要对信号进行分析和变换、扩展和压缩、滤波、参数估计、特性识别等加工,统称为信号处理。

信号处理分为模拟信号处理和数字信号处理两种。一般来说,模拟信号处理的对象是模拟信号,数字信号处理的对象是数字信号。因模拟信号经采样、模拟/数字变换,成为数字信号,而数字信号经过数字/模拟变换成为模拟信号。所以,若信号处理系统增加数字/模拟变换器,模拟信号处理系统也可以处理数字信号,若信号处理系统增加模拟/数字变换器,数字信号处理系统也可以处理模拟信号。在

实际工程应用中,这样的信号处理系统是经常采用的。

让我们看几个具体的信号处理的例子。

(1) 在直流稳压电源中,50Hz 交流电压经全波整流后,由于含有 100Hz 和更高的谐波分量,所以,其后必须经过低通滤波,保留直流分量,抑制交流分量到足够低的水平,以保证直流稳压电源的良好性能。图 1.3.1(a)是由电阻 R 和电容 C 组成的模拟低通滤波器;图 1.3.1(b)是数字低通滤波器的框图,它由延迟单元、乘法器和加法器组成。

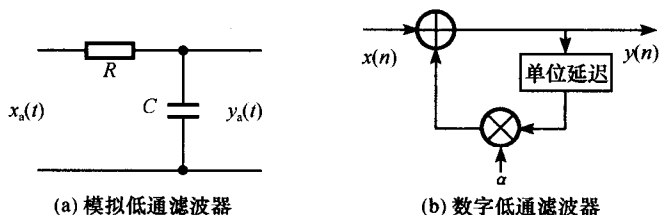


图 1.3.1 低通滤波器

(2) 线性调频信号是一种性能优良的扩频信号,其时宽 T 与带宽 B 的乘积 $D=BT$,代表了压缩后的功率信噪比相对于压缩前的功率信噪比的改善倍数。线性调频信号经匹配滤波进行压缩,为获得低旁瓣而加权压缩后信号的宽度 $\tau \approx 1.47/B$ 。线性调频信号通常在频域实现数字脉冲压缩,其基本原理是:线性调频信号经模拟/数字变换器获得数字信号,其离散傅里叶变换的结果与频域的加权系数相乘,乘积的离散傅里叶逆变换就是数字脉冲压缩后的数据。

(3) 雷达回波信号中,通常混有强度很大的固定杂波,它淹没了杂波中的运动目标。为了实现运动目标的显示,利用固定杂波其频谱分布在零频率附近的特性,设计与杂波谱相匹配、凹口在零频率附近的滤波器,抑制杂波,保留运动目标。这就是雷达信号处理中的动目标显示(MTI)。

从人们的日常生活到社会科学、自然科学、生产过程等领域,我们还可以举出许多信号处理的例子。信号处理,尤其是数字信号处理,已经和必将对社会发展、科技进步、生产力提高、人们生活水平的改善等各个方面,发挥越来越大的作用。

1.4 数字信号处理的实现方法

数字信号研究如何用“数字”方法来“处理信号”,其实现方法分为软件实现、硬件实现和硬软件结合实现。在讨论实现方法时,认为待处理的信号已被处理为数字信号。

(1) 软件实现方法。按照信号处理的原理和算法,编写程序(如用 Matlab 语