



普通高等院校电子信息类应用型规划教材

数字信号处理及应用

王永玉 孙 衢 编著

SHUZI XINHAO
CHULI JI YINGYONG



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

普通高等院校电子信息类应用型规划教材

数字信号处理及应用

王永玉 孙 衢 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、信息类专业学生的一门非常重要的专业基础课。本书阐述了数字信号处理的基本理论和算法,内容包括:离散时间信号和系统的时域及频域表示、有限长序列的离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)算法、数字滤波器的设计及实现。

本书通俗易懂地讲解了数字信号处理的基本理论、基本概念;特别注重其物理意义的阐述,减少了数学推导及分析;同时每一章节都有大量的例题,以辅助学习和巩固基本理论。本书是面向各独立学院电子、信息类专业学生的教材,也可以作为工程技术人员的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理及应用/王永玉,孙衢编著. —北京:北京邮电大学出版社,2009
ISBN 978-7-5635-2084-8

I. 数… II. ①王…②孙… III. 数字信号—信号处理 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 140678 号

书 名: 数字信号处理及应用

作 者: 王永玉 孙 衢

责任编辑: 孔 玥

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(邮编:100876)

发 行 部: 电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京忠信诚胶印厂

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 13.5

字 数: 331 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-2084-8

定 价: 25.00 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

前 言

随着信息技术的迅猛发展,数字时代的到来,数字信号处理技术的应用越来越广泛,不仅在通信、国防、航空航天、医疗、工业等很多领域发挥着重要作用,而且还走进了几乎每一个家庭,和人们的关系越来越密切。

“数字信号处理”这门课程是各高等院校电子、信息类专业学生的一门非常重要的专业基础课,学习这门课要求学生已经较好地学习了“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础知识。因此,“数字信号处理”这门课程有一定难度。

本书的编写尽可能地降低对读者基础知识的要求,对某些关键的基础知识做了适当的复习,尽可能在语言上通俗易懂,在内容上深入浅出。通过最简单的例子来阐述“数字信号处理”的基本原理、基本概念和基本算法,并且精选了大量的例题和习题,有助于读者牢固地掌握基础知识。使读者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深入内容。此外,在培养应用型人才的目标指导下,本书在基本理论的阐述中突出其物理意义,在例题、习题中尽量理论联系实际,使读者了解到数字信号处理的工程应用。

全书共8章,内容安排如下:

第1章首先介绍数字信号处理的基本概念,数字信号处理的应用,数字信号处理的研究内容及方法。

第2章全面叙述离散时间信号与系统的具体概念及定义,包括离散时间序列的定义,离散卷积的计算,系统的稳定性和因果性,离散时间信号和系统的频域表示,连续时间信号的采样及恢复等。

第3章介绍离散信号和系统的 z 变换分析,给出了 z 变换、 z 反变换的公式,讨论了 z 变换与傅里叶变换之间的关系,以及系统函数等概念。

第4章介绍周期序列的离散傅里叶级数(DFS)及有限长序列的DFT。

第5章介绍有限长序列的DFT的快速算法FFT。

第6章介绍数字滤波器的设计。首先介绍数字滤波器及滤波器的技术指标,特别强调滤波器指标的物理含义,然后介绍IIR滤波器的设计方法。

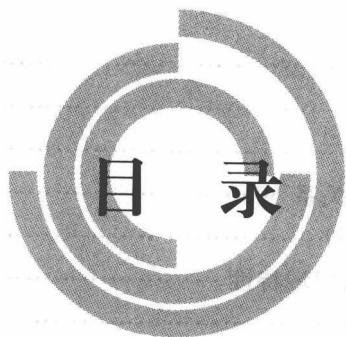
第7章介绍FIR滤波器的设计方法。

第8章介绍数字信号处理的实现及实现过程中的有限字长效应。

本书在编写过程中,参考了国内外出版的大量文献以及网站资料(这些资料在本书的参考文献中已尽量列出,若有遗漏深表歉意),在此对本书所引用文献的作者深表感谢。本书的内容也融入了作者所在课题组在数字信号处理教学和科研中的成果和经验,这里对课题组的全体人员一并表示感谢。

学好这门课关键在于实践,与此书同时我们编写了配套的实验教程及习题解答。

作 者



CONTENTS

第 1 章 绪论	(1)
1.1 数字信号处理的基本概念	(1)
1.2 数字信号处理的优越性	(3)
1.3 数字信号处理的应用	(4)
1.4 数字信号处理的研究内容	(5)
1.5 数字信号处理的实现方法	(6)
第 2 章 离散时间信号与系统	(8)
2.1 离散时间信号——序列	(8)
2.1.1 序列的表示	(8)
2.1.2 几种常用的序列	(9)
2.1.3 序列的基本运算	(14)
2.2 离散时间系统	(19)
2.2.1 系统的定义	(19)
2.2.2 线性系统	(19)
2.2.3 非时变系统	(20)
2.2.4 线性非时变系统	(21)
2.2.5 系统的稳定性和因果性	(24)
2.3 离散时间信号和系统的频域表示	(26)
2.3.1 离散时间系统的频率响应	(26)
2.3.2 离散时间序列的傅里叶变换	(29)
2.3.3 系统输入和输出序列的频域关系	(30)
2.4 序列傅里叶变换的性质	(31)
2.5 模拟信号的数字处理方法	(33)
2.5.1 连续时间信号的采样	(34)
2.5.2 采样信号的恢复	(38)

习题	(40)
第 3 章 z 变换	(44)
3.1 z 变换的定义和收敛域	(44)
3.2 z 反变换	(48)
3.3 z 变换与傅里叶变换的关系	(53)
3.4 z 变换的定理与性质	(55)
3.5 利用 z 变换分析系统的频域特性	(58)
3.5.1 系统函数	(58)
3.5.2 系统函数反映的系统特性	(59)
3.5.3 通过系统函数分析系统的频率响应	(60)
习题	(63)
第 4 章 离散傅里叶变换	(65)
4.1 离散傅里叶级数及基本性质	(65)
4.1.1 离散傅里叶级数	(66)
4.1.2 DFS 的基本性质	(68)
4.2 离散傅里叶变换及基本性质	(73)
4.2.1 离散傅里叶变换	(73)
4.2.2 DFT 导出过程的图形解释	(75)
4.2.3 离散傅里叶变换的性质	(77)
4.3 DFT 与 DTFT 及 z 变换之间的关系	(83)
4.4 频率分辨率及 DFT 参数的选择	(87)
4.5 DFT 的应用	(90)
4.5.1 用 DFT 计算线性卷积	(91)
4.5.2 用 DFT 对信号进行谱分析	(93)
习题	(95)
第 5 章 快速傅里叶变换	(98)
5.1 离散傅里叶变换的运算特点	(98)
5.2 基 2-FFT 算法	(100)
5.2.1 按时间抽取基 2-FFT 算法	(100)
5.2.2 按时间抽取的基 2-FFT 算法分析	(102)
5.2.3 按频率抽取的基 2-FFT 算法	(107)
5.3 几种 FFT 算法简介	(110)
5.4 快速傅里叶反变换算法	(110)
5.5 实序列的 FFT 算法	(111)

5.5.1	2 个 N 点实序列的 DFT	(111)
5.5.2	1 个 N 点实序列的 DFT	(112)
习题	.....	(114)
第 6 章	IIR 数字滤波器设计	(115)
6.1	IIR 数字滤波器简介	(115)
6.1.1	滤波器概述	(115)
6.1.2	数字滤波器的设计	(116)
6.1.3	IIR 数字滤波器的表示及设计方法	(118)
6.2	模拟低通滤波器的设计	(119)
6.2.1	巴特沃思滤波器	(120)
6.2.2	切比雪夫滤波器	(125)
6.2.3	椭圆滤波器简介	(129)
6.3	由模拟系统函数得到数字系统函数	(129)
6.3.1	冲激响应不变法	(130)
6.3.2	双线性变换法	(134)
6.4	高通、带通及带阻数字滤波器的设计	(138)
6.4.1	模拟滤波器变换的设计方法	(138)
6.4.2	数字滤波器变换的设计方法	(148)
6.5	最优化设计方法	(150)
6.5.1	时域最优化设计方法	(150)
6.5.2	频域最优化设计方法	(152)
6.5.3	零极点累试法	(152)
习题	.....	(153)
第 7 章	FIR 数字滤波器设计	(155)
7.1	线性相位的 FIR 数字滤波器	(156)
7.2	窗函数设计法	(161)
7.3	频率采样设计法	(172)
7.4	切比雪夫逼近设计法	(176)
7.4.1	切比雪夫最佳一致逼近设计过程	(176)
7.4.2	4 种类型的线性相位 FIR 滤波器统一表示式	(180)
7.5	IIR 数字滤波器与 FIR 数字滤波器比较	(182)
习题	.....	(183)
第 8 章	数字信号处理系统的实现	(185)
8.1	数字信号处理系统的基本结构	(186)

8.1.1	无限冲激响应(IIR)系统的基本结构	(187)
8.1.2	有限冲激响应(FIR)系统的基本结构	(192)
8.2	数字信号处理中的有限字长效应	(198)
8.2.1	二进制数的表示及量化误差	(198)
8.2.2	A/D转换的有限字长效应	(200)
8.2.3	IIR系统实现中的有限字长效应	(201)
8.2.4	FIR系统实现中的有限字长效应	(202)
8.2.5	FFT实现中的有限字长效应	(202)
习题	.....	(203)
参考文献	.....	(205)

第 1 章 绪 论

数字信号处理是起源于 17 世纪和 18 世纪数学的一个学科,今天它在各个科学和技术领域中,已经成为一种重要的现代化工具。数字信号处理采用的各种方法和它的种种应用已经有悠久的历史,就像牛顿和高斯那样古老,同时它又像计算机和集成电路那样,以崭新的面貌出现于今世。

1.1 数字信号处理的基本概念

信号处理有着悠久的历史,在各个不同的领域,如生物医学工程、声纳、雷达、地震学、语音、图像、通信等领域都充分显示出了它的重要性。在许多应用中,例如脑电图和心电图分析,或语音传输和语音识别系统中,我们可能是希望提取某些特征参数;在通信系统中,信号在通信信道上传输时,要受到各种干扰,其中包括信道失真、衰落和混入背景噪声,接收机的任务之一就是要把补偿掉这些干扰。这些都要求对信号进行处理。

所谓信号处理,就是对信号进行所需要的变换,或按照预定的规则进行简单或复杂的数学运算,使之便于分析、识别和加以利用。信号处理一般包括:变换、滤波、检测、频谱分析、调制解调和编码解码等。信号处理按照信号的表示和处理形式又分为“模拟信号处理”和“数字信号处理”。下面先看一下什么是模拟信号,什么是数字信号?

任何可测量的信号通常都以电信号形式表现,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,模拟信号(的电压或电流)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。如图 1-1 所示的信号都是模拟信号。

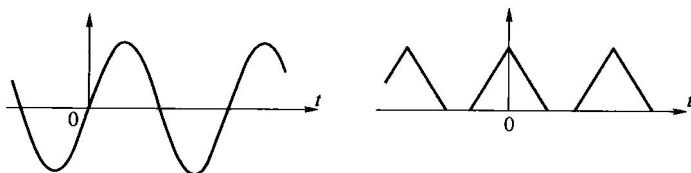


图 1-1 模拟信号的图形表示

对上述的模拟信号取其特定时刻有数值,而其他时刻数值为零,则为采样数据信号,也称为离散信号,其在时间上是离散的,幅值在一定范围内可连续取值,如图 1-2 所示。

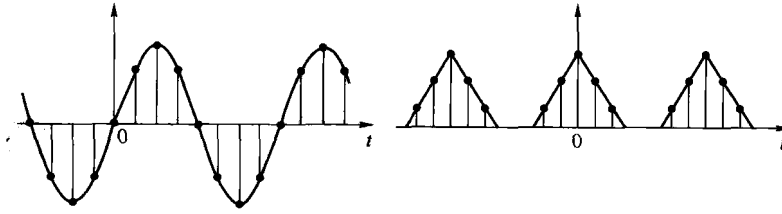


图 1-2 采样(离散)信号的图形表示

将采样数据信号的幅值量化并变为二进制数码序列,则此时信号称为数字信号。数字信号在时间上是离散的,其幅值也不能够连续变化,存在一个最小数量单位 Δ 。也就是说,数字信号在时间上和数值上都是离散的,如图 1-3 所示。

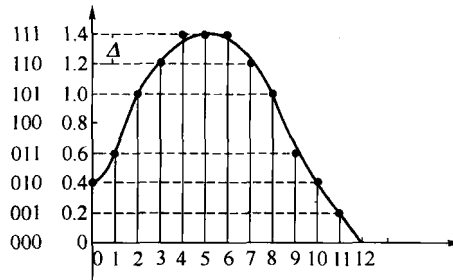
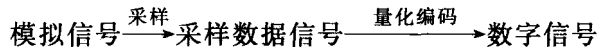


图 1-3 数字信号的图形表示

综上所述,有:



模拟信号处理是传统的信号处理手段,它采用模拟设备对模拟信号进行处理。模拟信号处理的优点是它具有实时性和简易性,但由于模拟系统的局限性,不能进行复杂的信号处理任务。

数字信号处理就是利用专用或通用数字系统(包括计算机)以二进制计算的方式对数字信号进行处理。处理的目的是估计信号的特征参数;或是对信号进行滤波,增强信号的有效分量,削弱无用分量;也可能是把信号变换成某种更符合要求的形式。总之,凡是用数字方式对数字信号进行滤波、变换、增强、压缩、估计和识别等问题都是数字信号处理研究的对象。数字信号处理系统具有很多优点,可以完成复杂的处理任务,在很多场合正逐步取代传统的模拟信号处理。图 1-4 给出了自然方式产生的模拟信号进行数字信号处理的过程。

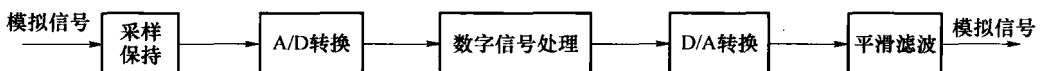


图 1-4 模拟信号的数字处理过程

在这个处理过程中,采样保持的作用是对模拟信号进行采样,并将采样得到的瞬时值保留一定的时间间隔,便于模/数(A/D)转换器进行转换。A/D转换对采样后的信号进行幅度的二进制量化,由于A/D转换器采用有限的二进制位,它所能表示的信号幅度也是有限的,这些幅度称为量化电平,A/D转换器以最接近于当前实际电平的二进制数码表示该电平(如图1-3中3位二进制编码可以表示8个电平),量化电平和模拟信号相比一般存在一定的误差,误差的大小和二进制位的多少直接有关。A/D转换后的信号是一串时间上做了离散化,幅度上做了量化的信号,称为数字信号,对数字信号进行处理的核心是通用或专用的计算机或处理器。处理后的信号有时还需要再还原成模拟信号,这一工作可以通过D/A转换器来完成,D/A转换器的输出信号类似于采样保持信号,是一阶梯状的连续时间信号,只有通过一模拟低通滤波器(也称作后置滤波器),滤除镜像的高频分量,才能得到平滑的模拟信号。若系统不需要输出模拟信号,则D/A转换和平滑滤波这两部分可以省去。

1.2 数字信号处理的优越性

数字信号处理采用通用或专用的计算机(处理器)等数字系统完成信号处理任务,与模拟信号处理相比较具有以下优点。

(1) 精度高。对模拟信号的处理是用由电感、电容、电阻等元件组成的模拟系统来完成的。在模拟系统电路中,元器件精度要达到 10^{-3} 以上已经很不容易了。若将模拟信号数字化以后处理,在数字系统中17位字长可达到 10^{-5} 的精度,目前在计算机和微处理器中,采用16位、32位的运算器和存储器已经很普遍了,再配合适当的编程或采用浮点算法,可以达到相当高的精度。因此,在一些要求高精度的系统中,甚至只能采用数字技术,例如高精度的数字频谱分析仪、高清晰度的数字电视系统等。

(2) 灵活性强。数字信号处理采用了通用或专用的数字系统,其性能取决于运算程序和各乘法器的系数,而这些系数均存放于数字系统中,只需要改变运算程序或系数,即可改变系统的特性参数,比改变模拟系统方便得多。

(3) 可靠性高。模拟系统中各元器件的参数受环境、温度等影响较大,而数字系统大多是由CPU、存储器、I/O接口器件等数字集成电路器件构成的,受环境因素的影响相对模拟器件要小得多,可编程系统还可以采用许多抗干扰方法,大大提高系统的可靠性。例如:模拟信号受到干扰即产生失真,而数字信号由于只有两种状态,只要所受干扰在一定的范围内,就不会产生影响;另外,如果用数字信号进行传输,在中继站还可以对畸变了了的脉冲波形进行整形,并使其再生。

(4) 便于大规模集成。数字信号处理系统主要由中、大规模集成电路等器件构成,数字器件具有高度的规范性,易于实现大规模集成和生产。特别是在处理低频信号时,由于处理低频信号的模拟元件(如电感、电容等)一般体积都较大,不易制作和使用,而转换为数字信号进行处理,就不会受到器件体积、重量的影响,比模拟系统要优越很多。

(5) 便于加密处理。随着信息技术的发展,信息安全引起了各个领域的关注,模拟系统

中进行加密等处理通常很难实现,而数字信号实际为数据序列,因此在数字信号处理过程中可以很方便地引入加密算法,从而进行加密处理。

(6) 复用性强。利用一套数字信号处理系统可以同时处理多路数字信号,因为数字信号在各采样点之间有一定的采样间隔,在这个间隔里可以同时处理几路信号。如图 1-5 所示为一个时分复用的数字信号处理系统。图中同步控制器通过多路开关控制各路信号,在时间上前后错开(利用采样间隔),依次进入数字信号处理系统,在处理完第 1 路信号的某时刻后,再处理第 2 路,处理完第 2 路后,再处理第 3 路,依次类推;同步控制器通过分路开关将处理结果分别送到各路输出,然后进行下一时刻处理,在各路输入信号输入下一个值之前,数字信号处理系统已将当前时刻的各路信号处理完一次,并将结果送到各路输出,对每路信号来讲,都好像单独使用数字信号处理系统一样。

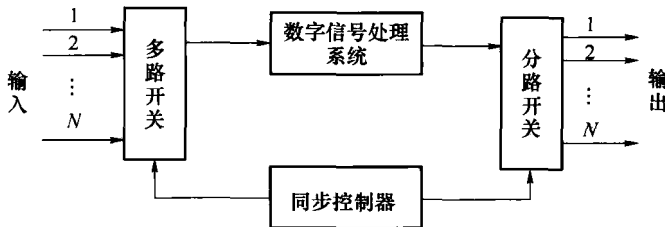


图 1-5 时分复用的数字信号处理系统

1.3 数字信号处理的应用

1978 年, A. V. Oppenheim 在他主编的《数字信号处理的应用》(Application of Digital Signal Processing)一书中,列举了数字信号处理在通信、语音、图像、声纳、雷达和地球物理等方面的应用实例。在过去 30 多年的时间里,这些系统已几经更新换代,发展极其迅速。例如在图像处理方面,图像数据压缩是多媒体通信、影碟机(VCD 或 DVD)和高清晰度电视(HDTV)的关键技术,国际上先后制定的标准有 H. 261、H. 263、H. 264、JPEG、JPEG2000、MPEG-1、MPEG-2 和 MPEG-4。此外,数字信号处理不断开辟新的应用领域,例如在机械制造中,基于快速傅里叶变换(FFT)算法的频谱分析仪用于振动分析和机械故障诊断;医学中使用数字信号处理技术对心电(ECG)和脑电(EEG)等生物电信号做分析和处理;新一代的广播电视体制如数字音频广播(DAB)、数字视频广播(DVB)广泛地使用了数字信号处理技术。以下是数字信号处理在不同领域的应用情况。

(1) 通信:通信系统中处处都有数字信号处理技术的应用,例如各种编码/译码、调制/解调、对通信信道的均衡、电话线路的回声对消、频分多址、时分多址、GPS 等。

(2) 自动控制:自动控制中的机器人控制、工业控制、电机控制、磁盘控制器、激光打印机控制、自动驾驶汽车控制等。另外,最优控制理论中的卡尔曼滤波、自适应控制等本身就是数字信号处理算法。

(3) 消费电子:消费电子产品中的数字无线收音机、数字电视、MP3 播放器、数码相机/摄像机、VCD/DVD、空调、洗衣机等。

(4) 语音处理:语音编码、压缩、增强、合成、辨识、文字-语音自动翻译等。

(5) 图像处理:图像的压缩、增强、传输、恢复、识别,机器人视觉等。

(6) 生物医学:生物医学中的脑电、心电、肌电、心音分析等均需要经过信号处理来提取有关参数,医疗器械中的诊断设备、超声设备(例如 CT)等都应用了数字信号处理技术。

(7) 军事领域:在雷达和声纳系统中,应用数字信号处理技术进行复杂的背景噪声环境下的信号检测,实现对目标的自动跟踪;导航系统和导弹制导、保密通信等无不是应用数字信号处理技术。

(8) 地质探测:石油与天然气勘探的重要手段就是地质勘探。地震法利用人工地下爆破来产生一个脉冲激励,以地层作为传输通道,在观测点上接收地震信号,该信号是由激励分量和反映地质构造的响应分量卷积而成的,同时受其他一些因素的影响,因此要采用包括同态滤波、最佳滤波在内的一套地震信号分析和处理技术。

下面我们引用 V. J. Sundaram 博士(印度 DRDL 和 RCL 的前任所长,前 Prithvi 项目主任)的一段话来概括当前信号处理技术的发展和应用:

一枚土星五号(Saturn V)火箭点火升空并将一个人降落在月球上,对于航空、机械、电气和控制工程师们来说最为关注的是各种发射信号。

一场海啸摧毁了圣诞节的节日气氛,地质学家和土木建筑工程师们急忙要去研究地震信号。虽然这些事件全然是不相同的,但是信号构成和分析方法却是类似的。一名外科医生拿起他的手术刀之前要求查看一下病人的心电图。一名警察要借助于语音识别和生物统计技术去捉拿一名罪犯。循游在人体内的一个纳米机器人为了辨识人体而发射出各种信号。板球队长们要去仔细查看卫星云图以确认雷雨的征兆。由于随处可见的处理器和嵌入式系统的发展,从月球飞行到圣诞海啸,信号处理已经跨出了惊人的一大步。道·琼斯从来不会想象到会被一种微小的,其时钟速度竟从 MHz 到 GHz 的 DSP 浸入到商业世界!

1.4 数字信号处理的研究内容

数字信号处理研究的主要任务就是在理论上建立一套描述输入数字信号、输出数字信号以及数字信号处理系统的特性的方法和算法,并研究在工程上如何实现这一系统。因此,数字信号处理的研究内容也包括数字信号处理的方法和算法的理论研究以及这些理论在实际应用中的实现两方面。对于数字信号处理的实现将在 1.5 节阐述,本节先介绍其理论研究内容。

数字信号处理就其学科本身而言历史久远,经典的数值分析方法(如内差、数值积分、微分等)可以看成早期的数字处理技术。随着计算机的诞生,为信号的数字处理提供了实现的可能,1965 年 FFT 的提出,是数字信号处理技术发展的里程碑,从此,数字信号处理技术进

入了一个崭新的高速发展阶段。数字信号处理应用领域的不断扩大也促使数字信号处理在理论和方法上向更深的层次发展。

数字信号处理的理论研究可以分为两个阶段：一维的确定信号的数字信号处理技术和多维的非平稳信号的数字信号处理技术。其中前者主要研究一维的离散时间信号和系统，是数字信号处理中最重要、最基本的研究内容，也是本书所要讲述的内容；后者主要研究在其基础上，对二维、多维阵列信号，非平稳信号进行研究和处理，属于较深的研究内容。因此本书主要介绍以下几个方面的内容：

- (1) 离散信号的分析方法：包括离散信号的时域和频域分析，离散信号的变换（傅里叶变换和 z 变换）。
- (2) 模拟信号的采样及恢复：采样定理。
- (3) 信号处理的快速算法：主要讲述快速傅里叶变换(FFT)、快速卷积。
- (4) 离散系统的分析和综合：包括离散系统的描述，因果性及稳定性分析，线性时不变系统，系统的频率响应，系统函数。
- (5) 数字滤波器系统的设计。

1.5 数字信号处理的实现方法

数字信号处理的实现方法一般分为以下几种：

(1) 在通用计算机上用软件实现。软件可以采用高级语言编写，也可以利用商业化各种数字信号处理软件(如 MATLAB、System View 等)。这种实现方法简单、灵活，但实时性较差，很少用于实时系统，主要用于教学或科研的前期研制阶段。

(2) 用普通的微控制器(MCU)实现。单片机技术发展很快，功能越来越强，可以用来做一些简单信号处理，但不能用于复杂的信号处理，可以用于比较简单的控制场合，如小型嵌入式系统、仪表等。

(3) 用通用的 DSP 芯片实现。DSP 芯片有着 MCU 无法比拟的突出优点：内部硬件乘法器、流水线和多总线结构、专用的 DSP 处理指令，具有很高的处理速度和复杂灵活的处理功能。近年来，DSP 技术发展得非常迅速，其性能越来越高，已经日益广泛地应用于各个领域。

(4) 采用专用的硬件电路实现。可以用加法器、乘法器、延时器以及它们的各种组合来构成数字电路，以实现所需要的运算；或采用专用的 DSP 芯片来实现专门的 FFT、滤波和卷积等的处理。这种实现方式具有很高的处理速度，但功能比较单一，灵活性不如通用的 DSP 芯片。

(5) 采用 SOC(System On a Chip)系统实现。随着大规模集成电路的发展，一个复杂的数字信号处理系统已可以集成在一个芯片上，即所谓的“片上系统”。SOC 包含有数字电路、模拟电路、模/数转换电路、微控制器以及数字信号处理器等。与传统的集成电路不同的是，嵌入式软件的设计也被集成到了 SOC 的设计流程中，SOC 的设计方法将以组装为基础，采

用自上至下的设计方法,在设计过程中大量充分使用自行设计开发或第三方拥有知识产权的 IP(Intelligent Property)模块。SOC 系统将是数字信号处理系统的一个新型实现方法。

数字信号处理的研究内容在理论和应用上涉及的范围极其广泛,数学中的微积分、随机过程、数值分析、矩阵和复变函数等都是它的基本工具;线性系统理论、信号与系统等都是它的理论基础;同时它和最优控制、通信理论以及人工智能、模式识别、神经网络等新兴学科有关联;在算法实现和 DSP 系统开发和应用中,要涉及电路、计算机以及许多新兴集成电路芯片的技术。

从数字信号处理的发展过程来看,它是紧紧围绕着“理论、实现和应用”三个方面展开的,它以众多学科为理论基础,其成果也渗透到众多学科,成为理论和实践并重、在高新技术领域占有重要地位的新兴学科。



第2章

离散时间信号与系统

离散时间信号与系统的理论在“信号与系统”这门课程中已做了详细的介绍,它是数字信号处理的基础,掌握了这些基础知识之后,才可以深入讨论数字信号处理的其他内容。本章重点复习离散时间信号与系统的理论,在复习这些内容的同时引入数字信号处理的研究内容。

2.1 离散时间信号——序列

2.1.1 序列的表示

信号在数学上通常表示为一个函数,这个函数表示一种信息,是一个自变量或几个自变量的函数。如果仅有一个自变量,则称为一维信号;如果有两个以上的自变量,则称为多维信号,本书仅研究一维数字信号处理的理论与技术。关于信号的自变量,有多种形式,可以是时间、距离、温度、电压等,本书一般把信号看作时间的函数。模拟信号是时间的连续函数,记为 $x(t)$;如果对模拟信号进行采样,即 t 仅在时间的离散点上取值,就得到了离散时间信号,记为 $x(nT)$, T 表示的是采样点之间的时间间隔, n 是一个整数。当然,也有一些离散时间信号本身就是离散的。因此,离散时间信号可以表示成下列形式:

$$\{x(nT)\} \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (2-1)$$

实际信号处理中,这些数字序列值按顺序放在存储器中,不同的 $x(nT)$ 只要靠 n 就可以区别,因此将 $x(nT)$ 表示为 $x(n)$,这是一种数学的抽象,在表示方式和数学推导上更加简洁,而且有利于应用成熟的数学工具来建立离散时间信号和系统的理论。但这种表示也忽略了信号本身的物理意义,在涉及“连续→离散”“离散→连续”概念时仍然要清楚 T 的含义,这一点在下面的采样定理中会详细说明。因此,一个离散时间信号可以定义为

$$\{x(n)\} \quad n=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (2-2)$$

$x(n)$ 表示第 n 时刻的离散时间信号 $\{x(n)\}$ 的值, $\{x(n)\}$ 定义在 n 等于整数上,在 n 不等于

整数上, $\{x(n)\}$ 没有定义, 但并不表示信号值为零。从数学角度来看, 式(2-2)表示一个序列, 因此也把离散时间信号称作离散时间序列, 简称序列。

序列除了数学表达式外, 还常常采用图形方式来表示, 如图 2-1 所示。虽然横坐标画成一条连续的直线, 但 $x(n)$ 仅仅对于整数的 n 值才有意义。

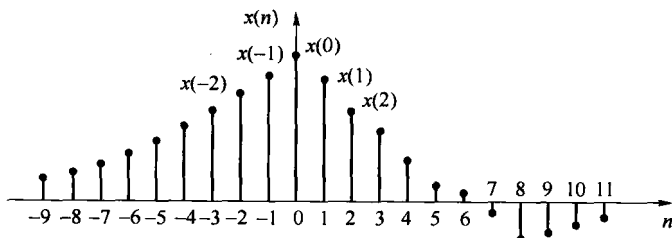


图 2-1 离散时间信号的图形表示

此外, 如果 $\{x(n)\}$ 是通过观测得到的一组离散数据, 还可以用集合符号表示:

$$\{x(n)\} = \{\dots, 1.3, 2.5, 3.3, 1.9, 0, 4.1, \dots\}$$

离散时间信号在时域上的定义是离散的, 在幅度上的定义是连续的, 如果将幅度进行量化, 时间上和数值上都取离散值, 则为数字信号。由于数字信号是幅度量化得到的, 在数学表示和推导中不如序列形式方便和容易, 所以一般都采用离散时间信号来讨论数字信号处理的理论和算法, 得到的结论在应用中考虑量化效应和有限字长的计算和存储效应后, 就变成数字信号处理。

2.1.2 几种常用的序列

1. 单位采样序列 $\delta(n)$

定义:

$$\delta(n) = \begin{cases} 1 & n=0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases} \quad (2-3)$$

单位采样序列 $\delta(n)$ 也可以称为单位脉冲(抽样)序列, 特点是仅在 $n=0$ 时取值为 1, 其他均为零。任何序列都可以通过单位采样序列 $\delta(n)$ 的移位加权组合表示出来。它类似于模拟信号和系统中的单位冲激函数 $\delta(t)$, 但不同的是 $\delta(t)$ 在 $t=0$ 时, 取值无穷大, $t \neq 0$ 时取值为零, 对时间 t 的积分为 1。单位采样序列和单位冲激信号如图 2-2 所示。

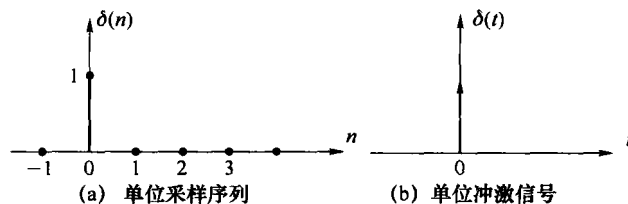


图 2-2 单位采样序列和单位冲激信号