

947
国外电子与通信教材系列

7N911.72-43
w47

数字信号处理基础

Fundamentals of Digital Signal Processing

[加] Joyce Van de Vegte 著

侯正信 王国安 等译

本书附盘可从本馆主页 <http://lib.szu.edu.cn/>
上由“馆藏检索”该书详细信息后下载,
也可到视听部复制

电子工业出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是关于数字信号处理(DSP)原理、实现和应用的最新教程。全书在概述了数字信号的产生、定义和处理实例之后,详细讨论了差分方程、数字卷积、 z 变换、离散时间傅里叶变换和傅里叶级数、数字滤波器、传输函数、频率响应、频谱、无限和有限脉冲响应数字滤波器的设计以及离散傅里叶变换和快速傅里叶变换等基本概念和基本理论。随后以较大篇幅介绍了DSP的硬件实现和编程、DSP在声音和图像处理以及小波分析中的应用。书中涉及的数学知识以简明形式给出,深入浅出,易于理解。本书概念清晰,图文并茂,将DSP基础理论与硬件实现、工程应用很好地结合在一起,汇集了DSP的新技术和新理论,具有系统性、先进性和实用性特点。

本书知识覆盖面宽、适用范围广,可作为理工类大专院校相关专业的本科生和研究生教材,对于DSP领域的工程技术人员也有很好的参考价值。

Simplified Chinese edition Copyright © 2003 by PEARSON EDUCATION NORTH ASIA LIMITED and Publishing House of Electronics Industry.

Fundamentals of Digital Signal Processing, ISBN: 0130160776 by Joyce Van de Vegte, Copyright © 2002.

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macau).

本书中文简体字翻译版由电子工业出版社和Pearson Education培生教育出版北亚洲有限公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有Pearson Education培生教育出版集团激光防伪标签,无标签者不得销售。

版权贸易合同登记号:图字:01-2002-2678

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理基础/(加)维格特(Vegte, J. V.)著;侯正信等译.-北京:电子工业出版社,2003.1
(国外电子与通信教材系列)

书名原文:Fundamentals of Digital Signal Processing

ISBN 7-5053-7661-6

I. 数... II. ①维... ②侯... III. 数字信号-信号处理-教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第094012号

责任编辑:马 岚 杜闽燕

印刷者:北京兴华印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编:100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:40.5 字数:1011千字 附光盘1张

版 次:2003年1月第1版 2003年1月第1次印刷

定 价:56.00元(含光盘)

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。

联系电话:(010) 68279077

前 言

数字信号处理(DSP)已不再被认为是研究生和科研人员才涉足的领域。目前,数字信号处理已渗透到人们日常生活和工作中,并且它的影响还在日益扩大。对于希望学习 DSP 原理、应用以及 DSP 语言的大学生、工程师和计算机科技工作者,本书旨在提供一套深入浅出,易于理解的教程。

首先,数字信号处理非常有趣。作者先从 DSP 的非数学性的概述入手,试图使读者直接感受到它的精彩,并且在后续章节中,将所列举的例子集中于现实生活的声音(如话音、鲸鱼声音和地震波)及图像(如指纹、细菌和机场 X 光线等)。配套光盘中提供了图表与声音的联系,使读者可亲自听到处理前后的信号。在讲述必要的理论知识后,深入研究了语音识别、图像处理、马达控制和加密等实际应用。

本书涉及 DSP 所有的基本概念,包括怎样进行变换和设计滤波器。书中的讨论自始至终贯穿大量的例子。为了便于理解,书中没有使用微积分。然而,书中所涉及到的数学知识非常重要,这些知识一般以尽可能简明的形式给出(即使具有深厚数学功底的同学也要侧重于 DSP,而不是数学问题)。理解本书内容所必备的数学知识在附录中给出。特别需要说明的是,在本书中,当对数函数的底数缺省时,就认为是以 10 为底。

第 1 章是数字信号处理的概述,概括介绍了本书的主要内容,而未涉及数学基础;第 2 章讲述了如何从现实的模拟信号获得数字信号;第 3 章提供了一些定义和处理数字信号的实例;第 4 章至第 8 章涵盖了 DSP 重要基础理论的主要内容,论述了差分方程、数字卷积、 z 变换、离散时间傅里叶变换和离散傅里叶级数,阐述了滤波器、传输函数、频率响应和频谱的基本概念;第 9 章和第 10 章阐述了滤波器的设计,包括无限脉冲响应和有限脉冲响应滤波器;实际应用方面则从第 11 章开始,讨论了离散傅里叶变换和快速傅里叶变换;第 12 章和第 13 章分别分析了 DSP 的硬件和编程问题;DSP 在声音和图像中的应用在第 14 章和第 15 章进行研究;最后,第 16 章介绍了小波理论及其应用;附录 A 给出了必备数学知识,其他附录则证明了书中的有关命题,所以本书相对来说是独立的,不需要参阅其他参考书。另外,每章后附有小结和习题。配套光盘中包含大多数章节的实例声音、图像、数据及视频片断,也包含了频谱图和小波的软件。书边的太阳符号表明光盘中有所谓的说明材料。光盘中还包含 MATLAB 文件及其应用的例子,方便读者验证书中所叙述的方法。这些文件还可用来解决许多书后的习题。光盘中还有章节中基本概念的小测试。教学辅导材料中包括书中问题的解答、基于 MATLAB 和模拟器件公司的 ADSP-2181 EZ-KIT Lite DSP 开发工具的实验及实验指导。教学辅导材料配套光盘中收有 PowerPoint 制作的主要图表的幻灯片、实验指导及答案。欢迎对本书及软件提出意见、建议或指正,并通过 millsj@camosun.bc.ca 寄至 Joyce Mills(née Van de Vegte)。

本书对数学知识的要求适中,适合作为理工科类院校大学二年级教材。DSP 将逐渐成为基本的技术,随着提前讲授 DSP 课程的压力加大,本书将有所帮助。

目 录

第 1 章 数字信号处理概述	1
1.1 信号与系统	1
1.2 模/数和数/模转换	5
1.3 数字信号及其频谱	8
1.4 数字滤波	13
1.5 语音、音乐、图像及其他	16
小结	18
习题	18
第 2 章 模数转换和数模转换	22
2.1 简单的 DSP 系统	22
2.2 采样	22
2.2.1 奈奎斯特采样理论	22
2.2.2 从频率角度看采样	26
2.3 量化	32
2.4 模数转换	37
2.5 数模转换	39
小结	42
习题	42
第 3 章 数字信号	47
3.1 数字信号的图示	47
3.2 数字信号的符号	48
3.3 数字函数	51
3.3.1 脉冲函数	51
3.3.2 阶跃函数	54
3.3.3 幂函数和指数函数	58
3.3.4 正弦函数和余弦函数	61
3.4 合成函数	66
3.5 二维数字信号	69
小结	71
习题	71
第 4 章 差分方程与滤波	75
4.1 滤波基础知识	75

4.2	模拟滤波器和数字滤波器	80
4.3	线性、时不变、因果系统	81
4.4	差分方程	81
4.5	叠加原理	85
4.6	差分方程流程图	87
4.6.1	非递归差分方程	87
4.6.2	递归差分方程	90
4.7	脉冲响应	93
4.8	阶跃响应	99
	小结	101
	习题	102
第5章	卷积与滤波	109
5.1	卷积基础	109
5.2	差分方程与卷积	117
5.3	滑动平均滤波器	119
5.4	数字图像滤波	122
	小结	125
	习题	126
第6章	z 变换	129
6.1	z 变换基础	129
6.2	传输函数	133
6.2.1	传输函数和差分方程	133
6.2.2	传输函数和脉冲响应	135
6.2.3	计算滤波器输出	136
6.2.4	传输函数的级联和并联	136
6.3	逆 z 变换	138
6.3.1	标准式	138
6.3.2	简单的逆 z 变换	140
6.3.3	长除法求逆 z 变换	141
6.3.4	部分分式展开法求逆 z 变换	143
6.4	传输函数与稳定性	148
6.4.1	极点与零点	148
6.4.2	稳定性	150
6.4.3	一阶系统	153
6.4.4	二阶系统	156
	小结	166
	习题	167

第 7 章 傅里叶变换与滤波器形状	173
7.1 傅里叶变换基础	173
7.2 频率响应及其他形式	176
7.2.1 频率响应和差分方程	176
7.2.2 频率响应和传输函数	177
7.2.3 频率响应和脉冲响应	177
7.3 频率响应和滤波器形状	178
7.3.1 滤波器对正弦输入的作用	178
7.3.2 幅度响应和相位响应	181
7.3.3 模拟频率 f 与数字频率 Ω	192
7.3.4 由极零点确定滤波器形状	197
7.3.5 一阶滤波器	200
7.3.6 二阶滤波器	201
小结	205
习题	206
第 8 章 数字信号频谱	211
8.1 频谱的意义	211
8.2 非周期数字信号	211
8.3 周期数字信号	218
小结	229
习题	230
第 9 章 有限脉冲响应滤波器	235
9.1 有限脉冲响应滤波器基础	235
9.2 再论滑动平均滤波器	237
9.3 相位失真	239
9.4 逼近理想低通滤波器	244
9.5 窗函数	249
9.5.1 矩形窗	249
9.5.2 汉宁窗	251
9.5.3 哈明窗	253
9.5.4 布莱克曼窗	253
9.5.5 凯塞窗	255
9.6 低通 FIR 滤波器设计	257
9.6.1 设计指南	257
9.6.2 低通 FIR 滤波器设计步骤	259
9.7 带通和高通 FIR 滤波器	266
9.8 带阻 FIR 滤波器	275
9.9 等波纹 FIR 滤波器设计	279

9.10 实际 FIR 滤波器的问题	281
小结	283
习题	284
第 10 章 无限脉冲响应滤波器	289
10.1 无限脉冲响应滤波器基础	289
10.2 低通模拟滤波器	290
10.3 双线性变换	293
10.4 巴特沃斯滤波器设计	299
10.5 切比雪夫 I 型滤波器设计	306
10.6 脉冲响应不变法 IIR 滤波器设计	312
10.7 “最佳拟合”滤波器设计	315
10.8 带通、高通和带阻 IIR 滤波器	315
10.9 实际 IIR 滤波器的问题	322
小结	324
习题	324
第 11 章 DFT 和 FFT 处理	328
11.1 DFT 基础	328
11.2 与傅里叶变换的关系	346
11.3 与傅里叶级数的关系	349
11.4 DFT 窗效应	349
11.5 频谱图	354
11.6 FFT 基础	358
11.7 2D DFT/FFT	361
小结	361
习题	362
第 12 章 DSP 硬件	367
12.1 数字信号处理器基础	367
12.2 DSP 的结构	368
12.3 定点和浮点数格式	371
12.4 DSP 硬件单元	375
12.4.1 乘法器/累加器	375
12.4.2 移位器	376
12.4.3 地址发生器	377
12.5 DSP 汇编语言	378
12.6 如何选择 DSP	379
12.6.1 定点或浮点	379
12.6.2 数据宽度	380

12.6.3	硬件和软件特性	380
12.6.4	速度	380
12.6.5	存储器	381
12.6.6	功耗	381
12.6.7	支持硬件	381
12.6.8	便捷性	381
12.6.9	成本	382
12.6.10	应用	382
12.7	DSP 制造商	383
12.7.1	模拟器件公司	383
12.7.2	德州仪器公司	384
12.7.3	摩托罗拉公司	386
小结		387
习题		387
第 13 章	DSP 编程	391
13.1	ADSP-2181 处理器	391
13.2	EZ-KIT Lite 开发板	392
13.3	数字格式和缩放	393
13.4	寄存器	399
13.5	汇编语言指令	401
13.5.1	ADSP-2100 系列指令	401
13.5.2	汇编语言举例	402
13.6	EZ-KIT Lite 板的安装和初始化	407
13.7	在 EZ-KIT Lite 上运行程序	418
13.8	DSP 应用	419
13.8.1	正弦波发生器	419
13.8.2	FIR 滤波器	422
13.8.3	IIR 滤波器	424
小结		426
习题		426
第 14 章	信号处理	429
14.1	数字音频	429
14.1.1	数字音频基础	429
14.1.2	过采样和抽取	429
14.1.3	插零和内插	432
14.1.4	抖动和压扩	435
14.1.5	音频处理	438
14.2	语音识别	440

14.3	语音和音乐合成	448
14.4	地球物理学处理	454
14.5	加密	462
14.5.1	加密基础	462
14.5.2	相当有效加密	463
14.5.3	数据加密标准	465
14.5.4	用于加密的 DSP	472
14.6	马达控制	473
	小结	476
第 15 章	图像处理	478
15.1	图像处理基础	478
15.2	直方图和直方图均衡	480
15.3	合成图像	484
15.4	扭曲和变形	488
15.5	图像滤波	492
15.6	模式识别	496
15.6.1	特征识别	496
15.6.2	物体分类	500
15.7	图像频谱	503
15.7.1	图像频谱基础	503
15.7.2	断层成像	507
15.8	图像压缩	514
	小结	518
	习题	519
第 16 章	小波	525
16.1	小波基础	525
16.2	小波族	533
16.3	信号编码	537
16.4	多分辨分析	545
16.5	离散小波变换	548
16.5.1	离散小波变换基础	548
16.5.2	从频率角度看小波分析	552
16.5.3	从频率角度看小波综合	553
16.5.4	离散小波变换的计算	554
16.5.5	二维 DWT	563
16.6	划分时间-尺度平面	567
16.7	小波压缩	569
16.7.1	小波压缩基础	569

16.7.2 FBI 指纹图像压缩标准	574
小结	576
习题	577
附录 A 必备数学知识	583
附录 B 信噪比	597
附录 C 递归滤波器的直接 2 型实现	599
附录 D 时域卷积和频域乘积	600
附录 E 离散傅里叶级数和离散傅里叶变换中的比例因子	601
附录 F 逆离散时间傅里叶变换	602
附录 G 理想低通滤波器的脉冲响应	603
附录 H 采样性质	604
附录 I 数字余弦信号的频谱	605
附录 J 脉冲序列的频谱	606
附录 K 采样的频谱效应	607
附录 L 巴特沃斯递归滤波器阶数	609
附录 M 切比雪夫 I 型递归滤波器阶数	610
附录 N 小波结果	611
术语表	614

第1章 数字信号处理概述

本章概述了后续章节中将要进一步讲述的内容。本章内容包括：

- 区别模拟信号和数字信号
- 给出模/数转换的基本步骤
- 给出数/模转换的基本步骤
- 介绍信号与其频谱的关系
- 阐明滤波的基本概念
- 讨论数字信号处理的应用

1.1 信号与系统

计算机所使用的是数字信号。随着计算机应用的普及,对数字信号进行高效处理的需求日益迫切,并且,现代计算机的高速处理能力引起了数字信号的广泛应用,进一步促进了数字信号技术的发展。数字信号处理(或简称 DSP),对于许多应用来讲都是必需的,图 1.1 中列出了其中一些应用。

· 按键电话	· 语音合成
· 图像边缘检测	· 回波抵消
· 数字信号及图像滤波	· 耳蜗移植
· 地震波分析	· 抗锁制动
· 文字识别	· 信号及图像压缩
· 语音识别	· 降噪
· 磁共振成像(MRI)扫描	· 压扩
· 音乐合成	· 高清晰度电视
· 条形码阅读器	· 数字音频
· 声纳处理	· 加密
· 卫星图像分析	· 马达控制
· 数字测绘	· 远程医疗监护
· 蜂窝电话	· 智能设备
· 数字摄像机	· 家庭保安
· 麻醉剂及爆炸物检测	· 高速调制解调器

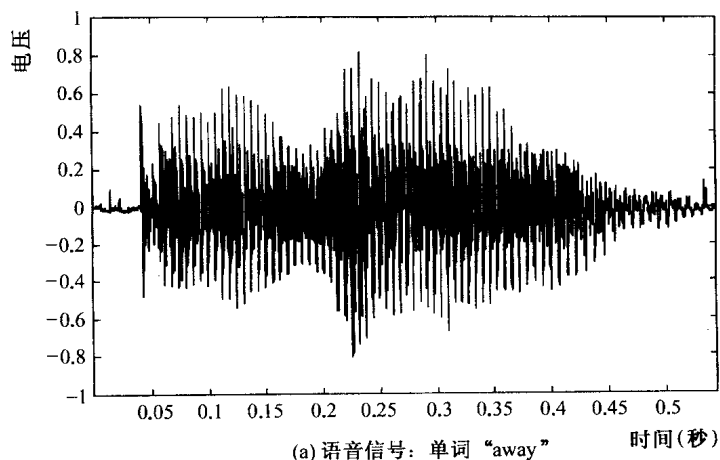
图 1.1 DSP 的应用实例

DSP 内部存在着要处理的信号。信号是将信息从一处携带到另一处的变化。例如,外界具有人们可感受到的压力或光强度的变化,人们所听到的声音就是耳膜感觉到的压力变化,所看到的图像就是视网膜感受到的光强度变化。这些信号都是模拟信号(analog signal),它们在任意时刻都有值,且可取连续值范围内的任意值。声音是一维模拟信号:压力变化的大小(或幅度)随时间改变;还有,北美地区电线上的输出电压在其最大值和最小值之间平滑变化,

每秒 60 次。图 1.2 给出了一些一维信号的例子。图像是二维模拟信号:亮度在图像的水平方向和垂直方向上均发生变化。图 1.3 给出了一幅黑白图像,图 1.4 给出了高速数字图像序列中的 4 帧。



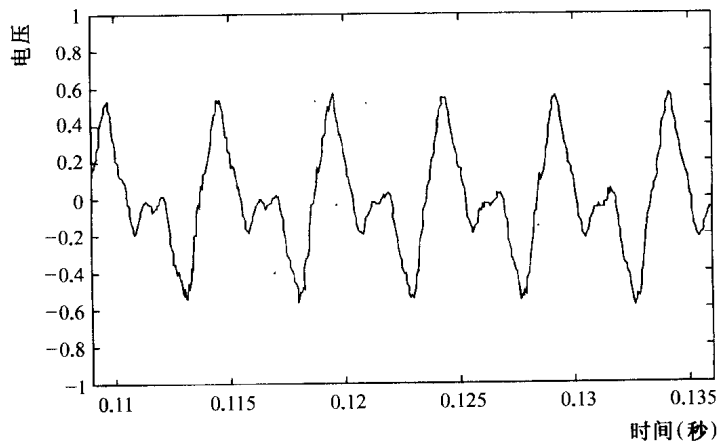
away . wav



(a) 语音信号: 单词“away”



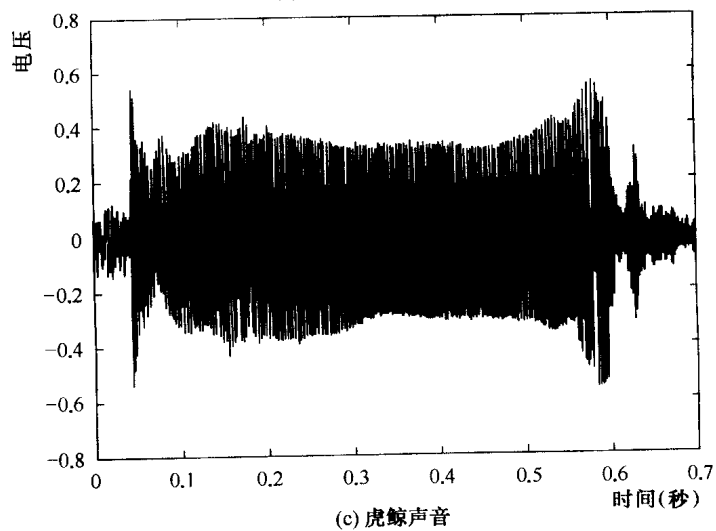
ooo . wav



(b) 语音信号: 元音“ooo”



orca . wav



(c) 虎鲸声音

图 1.2 信号实例

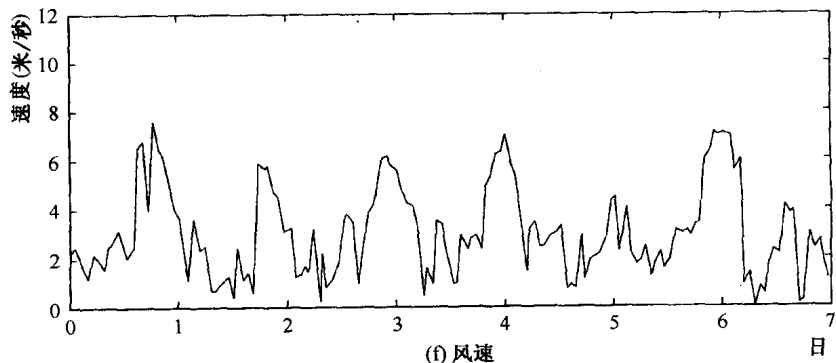
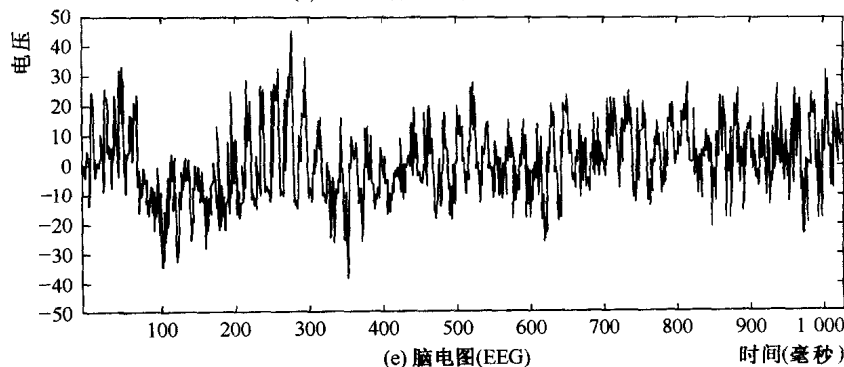
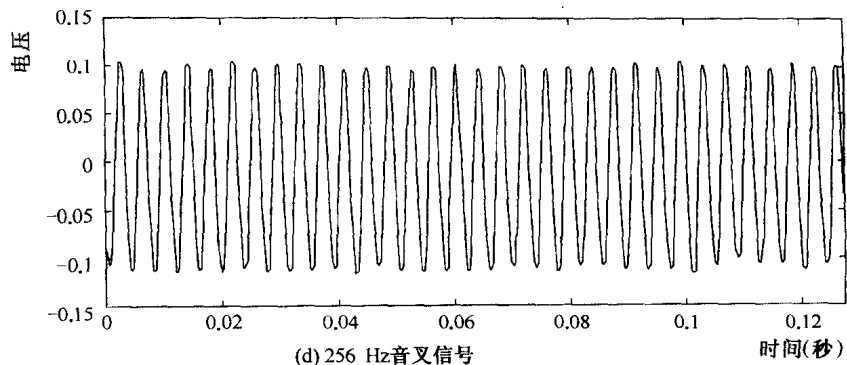


图 1.2 信号实例(续)

要对信号进行处理,必须首先获取信号。例如,声音信号可通过麦克风将声信号转变为电信号。而图像可通过模拟或数字照相机来获得,模拟照相机中,光信号控制胶片上的化学反应;数字照相机中,物体的光信号产生电荷包,转变为二维栅上的电信号,这些电信号与产生它们的光信号一样,自然也是模拟信号。模拟信号在任意时刻取值,并具有无限多个电平,不适合计算机处理。所以在处理前,必须将它们进行采样并转换为数字形式。数字信号(digital signal)只在有限的时间点上取值,并具有有限个电平,所以非常适合计算机处理。

在大多数数字信号处理系统中数字信号和模拟信号二者都出现。系统输入端的模拟信号转换为数字形式,再进行处理,处理后,数字形式的信号再转换为模拟信号输出。灵活快速的DSP是在只存在数字信号的处理阶段实现的。图 1.1 中所列的应用实例均是系统(system)。系统可以对信号进行分析、合成、修正、记录或播放。例如,图像压缩系统对数字图像进行再编码,使图像占用较少的内存空间,并以较短的时间在网间传输。语音识别系统用来自动识别人

的声音。再例如,数字滤波器允许某些信号频率通过,而滤除其他信号频率。总之,数字信号处理多种多样。任何对数字可行的运算,同样适用数字信号,使用专用 DSP 软、硬件,可进行快速运算。

数字系统与模拟系统相比有许多优点。模拟系统是由元器件搭建而成的电路,而元器件的特性在制造误差范围内差异很大,且特性还会随温度而改变,从而改变了电路的性能。相比之下,数字系统的工作具有可预测性和可重复性。由于数字系统主要取决于软件,所以它的性能几乎不受以上因素的影响。因此,数字系统比模拟系统有更好的抗噪声性能。此外,数字系统比模拟电路体积小、功耗低。不过,数字技术的最大优势是它的灵活性,可通过简单地更改程序中的一些语句来修改设计,而大多数模拟系统的重新设计则往往需要重新搭建电路。

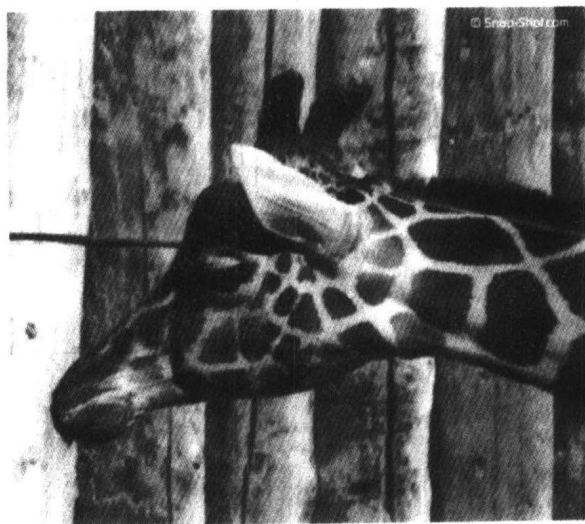


图 1.3 黑白照片(© Snap-shot.com)

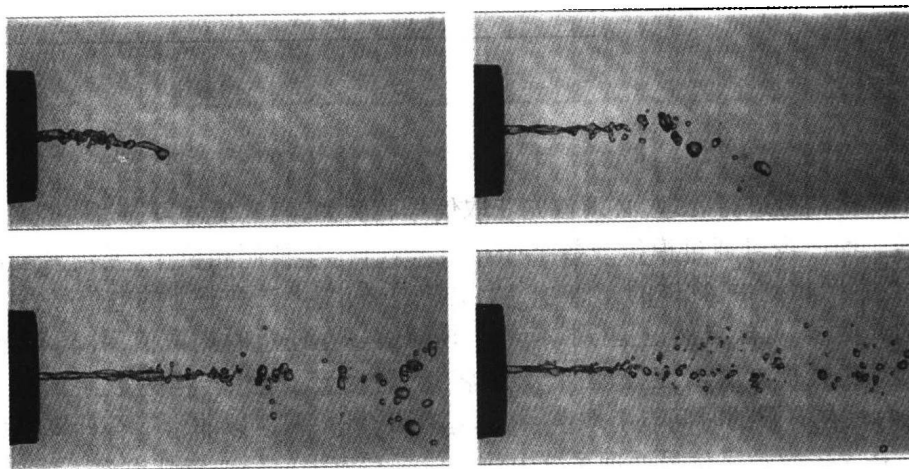


图 1.4 高速图像序列中的 4 帧(© Vision Research, Inc., Wayne, N.J., USA)

1.2 模/数和数/模转换

人们周围的声音和图像都是模拟信号。为了处理这些信号,要用到各种相应的传感器。各种信号的传感器是不同的。麦克风是最普通的声音传感器;光的变化可通过半导体器件记录,此类器件有光电二极管、光电晶体管以及 CCD(电荷耦合器件)芯片,它们的载流能力随着入射光而变化;温度可通过阻值随温度变化的热敏电阻、半导体器件测得,或利用热电偶测量,热电偶由两种不同的金属制成,两种不同的金属对温度的反应不同,从而形成电压;加速计用来测量加速度。其他传感器还有应力传感器、压力传感器和流量传感器。

这些传感器的输出通常为与被测信号成比例的电信号(电压或电流)。而这个模拟电信号必须转换成数字的形式。图 1.5 所示为电压信号。此信号可取其最小和最大值之间的任意值,且在任意时刻均有值。

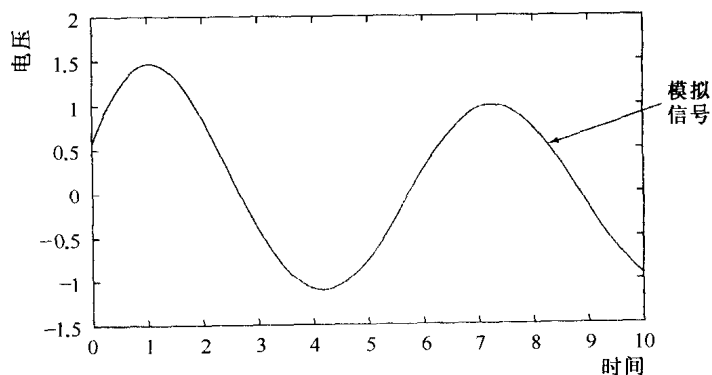


图 1.5 模拟电压信号

模/数转换[analog-to-digital (A/D) conversion]分两步进行。第一步是采样。采样时刻通常处在固定的间隔点上,这个间隔称为采样周期。在每一个采样点对模拟信号进行采样,且将该采样值保持到下一个采样点的过程称为采样保持(sample and hold)。图 1.6 为图 1.5 所示模拟信号的采样保持信号,图中竖的虚线标明采样点。采样要足够快,以捕捉被采样信号中的最快变化;如果采样太慢,将丢失重要的信号特征,出现混叠(aliasing)。注意,采样也要占用有限的时间,称为采样器的采集时间(acquisition time)。图 1.6 中夸大了采集时间的长度,所以采样保持信号看上去短暂地跟随被采样信号变化。以后,假定采集时间可忽略不计。

模/数转换的第二步是对模拟值进行量化和数字化,这在采样完成后即可进行。采样保持期间有足够的时间完成这一步。每个采样结束后,转换器尽快选择与采样保持电平最接近的量化电平(quantization level),然后分配一个二进制数字代码(digital code)来标识这个量化电平,至此,完成了模/数转换过程。图 1.7 给出了图 1.6 的数字信号。这个数字信号表示每个采样点的量化电平(而不是数字代码),用每个采样点上顶端带小圆圈的竖线表示。数字信号只在采样点这些离散时间点上值。

注意,图 1.7 中的数字信号值一般与该采样点的模拟信号值不一致。由于计算机存储是数字方式,所以不可能完全一致。计算机所用的数值以二进制形式存储于存储单元中。二进制值只能用称为比特(bit)的 0 和 1(或二进制数)表示。计算机中,存储单元是硬件结构,它储

存一组比特,每个存储单元可存储 8,16 或 32 比特。每个存储器单元的比特数制约了模拟信号转换为数字信号的精度。这一转换过程称为量化(quantization)。例如,假设将取值 -2.5 V 至 $+1.5\text{ V}$ 的模拟电压值转换为 2 比特的数字信号,在 2 比特系统中,只有 00,01,10,11 这 4 种可能的数字值。而这些代码必须能代表任意可能的输入电压值。例如, -0.5 V 到 $+0.5\text{ V}$ 的值可能编码为 00,而 $+0.5\text{ V}$ 至 $+1.5\text{ V}$ 的电压编码为 01,依此类推。由于许多不同的电压值具有同一个代码,所以大多数 A/D 转换器会引入量化误差(quantization error)。4 种可能的数字代码意味着只有 4 个量化电平。为了减小量化误差,这些电平通常处于每个数字代码所对应的模拟范围的中心。例如 -0.5 V 至 $+0.5\text{ V}$ 的模拟电压值转换为数字代码 00,则该代码的量化电平将处于模拟间隔的中心,即 0 V 。这意味着转换过程中,误差幅度可达 0.5 V 。计算机所用的比特数越多,这些误差越小,但不可能完全避免。

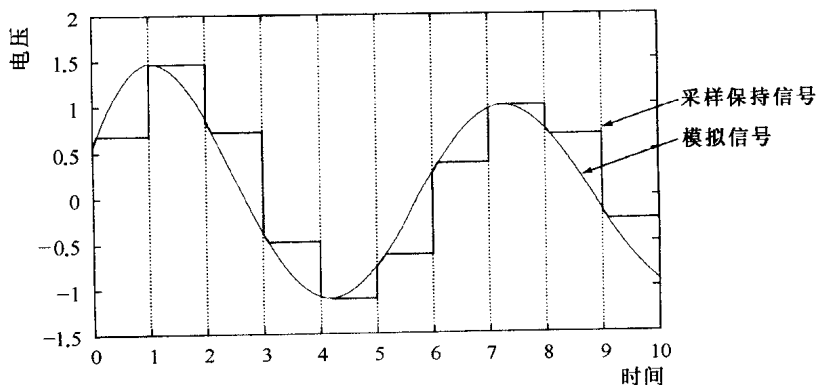


图 1.6 采样保持信号

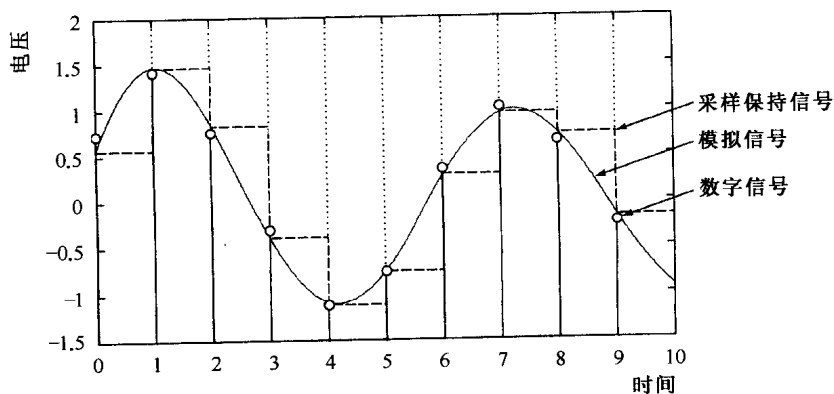


图 1.7 量化与数字化

A/D 转换器得到的数字信号有两个重要特点。首先,所允许的数字信号取值的个数是由计算机所用比特数限定的。第二,数字信号仅在采样时刻有值:在采样点之间没有定义。处理后,数字信号一般还要转换为模拟信号的形式。例如,数字信号不适合驱动扬声器,而要正确地再现声音,则需要模拟信号。数/模转换[digital-to-analog(D/A) conversion]的第一步是把数字代码转换为与其成比例的模拟电压。图 1.8 所示为数字信号,每个采样点处的高度对应数字代码得到的模拟电压。这个模拟电压的电平保持一个采样周期,称为零阶保持(zero order

hold)。图 1.9 给出了叠加在数字信号上的零阶保持(ZOH)信号。ZOH 信号是模拟信号,但它的阶梯形状与最初被采样的模拟信号不一致。因此,D/A 转换的第二步就是平滑该零阶保持信号。这个平滑步骤会引起时移的副作用。图 1.10 为最终的模拟信号。

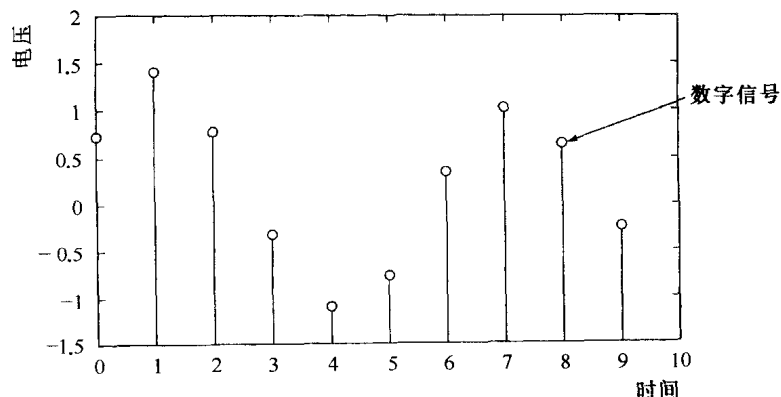


图 1.8 数字信号

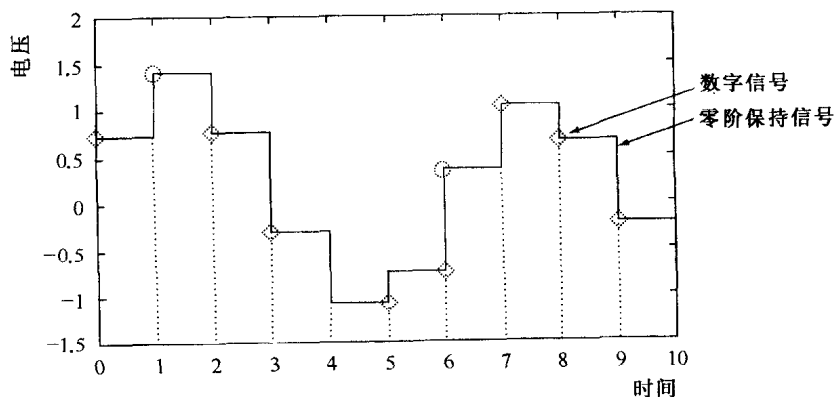


图 1.9 零阶保持信号

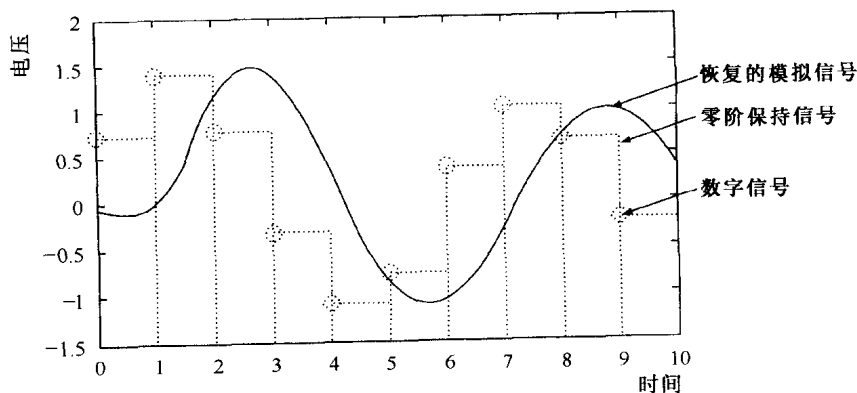


图 1.10 平滑后恢复的模拟信号

图 1.11 给出了 A/D 和 D/A 转换的所有步骤。当信号为数字形式时,可进行处理。若未进行数字信号处理,则 A/D 转换得到的数字信号就是驱动 D/A 转换的数字信号。这种情况下,