

数字信号处理

——理论与应用

第2版

俞一彪 孙兵 / 编著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

高等学校电子信息类专业精品教材

数字信号处理 ——理论与应用

(第2版)

俞一彪 孙兵 编著

东南大学出版社

· 南京 ·

内 容 简 介

全书系统地介绍了数字信号处理的基础理论、基本算法和基本应用。内容包括:离散时间信号与系统,傅立叶变换与频谱分析,离散傅立叶变换与快速算法,无限脉冲响应数字滤波器设计,有限脉冲响应数字滤波器设计,多采样率信号处理与小波变换,离散随机信号处理。

书中注重物理概念的透彻分析与介绍,强调理论与实际应用的结合。考虑到频谱分析在实际应用中的重要性,单独设置一章对频谱的概念和频谱分析的意义进行了详细的介绍。另外,还增加了短时傅立叶变换、多采样率信号处理、小波变换以及离散随机信号处理方面的新内容。通过大量例子说明了各种线性相位有限脉冲响应数字滤波器的设计方法以及信号处理的应用。书中配有丰富的例题和习题,主要章节配有实验指导书。

本书可作为高等院校电子信息工程、通信工程、自动控制、生物医学工程等本科专业的教材,也可供研究生及从事相关领域工作的工程技术人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理:理论与应用/俞一彪,孙兵编著.

2版. —南京:东南大学出版社,2011.7

ISBN 978-7-5641-2902-6

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 147991 号

数字信号处理——理论与应用(第2版)

出版发行 东南大学出版社

出版人 江建中

社 址 南京市四牌楼2号

邮 编 210096

经 销 江苏省新华书店

印 刷 南京京新印刷厂

开 本 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张 16.5

字 数 402千字

版 次 2011年7月第2版

印 次 2011年7月第1次印刷

书 号 ISBN 978-7-5641-2902-6

定 价 32.00元

(凡因印装质量问题,请与我社读者服务部联系。电话:025-83795801)

第 2 版前言

本书自 2005 年出版以来得到了广大读者的欢迎,并被很多高校采用为本科教材和研究生入学考试参考教材。此书被评为校精品教材,相应的课程被评为江苏省精品课程。许多阅读过本教材的高校教师都对注重物理概念、工程含义以及理论与实际应用相结合的写作思路给予了肯定,同时,也提出了他们在具体教学中的一些体会和建议。我们在这些年的教学中也有了更多的认识和经验,希望将此书进一步完善。

第 2 版与第 1 版的主要区别有以下五点:

- (1) 第 1 章增加了对高维信号的介绍,以利于读者的全面了解;
- (2) 第 1 章的线性系统描述部分对差分方程的描述方法进行了补充介绍,分析了差分方程的特征与优越性;
- (3) 第 4 章给出了一个完整巴特沃兹滤波器设计举例,使读者有一个完整的 IIR 滤波器设计概念;
- (4) 第 1 章至第 5 章都补充了二维图像信号处理的应用举例;
- (5) 每章最后都增加一个小结,并对和该章内容相关的一些新理论进行简要介绍。

在调整和补充内容的同时,对原书中存在一些错误也进行了修正,但很有可能仍然存在一些细小的错误,敬请广大读者批评指正。Email: yuyb@suda.edu.cn。

俞一彪

2011 年 5 月

前 言

随着半导体集成电路和计算机技术的迅速发展,数字信号处理的理论和技术已经应用到社会的各个方面,成为整个数字化技术的基础,“数字信号处理”也成为电子信息、通信、自动控制、机电、生物医学工程等本科专业的必修课程。如何针对本科专业特点,深入浅出地介绍数字信号处理基础理论,透彻地分析其中的物理概念,做到理论联系实际是非常具有挑战性的。

本书是作者在多年“数字信号处理”课程教学的基础上,参考国内外相关文献资料,结合多年教学实践经验编著而成。全书内容包括:(1)离散时间信号与系统;(2)傅立叶变换与频谱分析;(3)离散傅立叶变换与快速算法;(4)无限脉冲响应数字滤波器设计;(5)有限脉冲响应数字滤波器设计;(6)多采样率信号处理与小波变换;(7)离散随机信号处理。数字信号处理理论尽管运用了大量的数学公式,但本书注重公式背后物理概念的分析和描述,强调理论及技术的具体应用。同时,对传统的教科书内容进行了调整,将Z变换、有限字长效应等内容进行了合并和简化,对有重要实际应用价值的傅立叶变换与频谱分析进行了突出和详细的介绍,强化了频谱的概念和频谱分析的意义。另外,考虑到数字信号处理理论和应用的最新发展,在传统内容的基础上增加了一些新的内容,以便读者更多地了解实际应用中需要的知识和最新理论。作为一本教材,体系结构应该完整清晰,不应该也不可能包罗万象,因此,关于 Matlab 以及 DSP 处理器的内容本书没有介绍,该方面的内容可以通过其他课程或资料学习。

本书区别于其他一些相关书籍的主要特点如下:

(1) 单独设置第2章“傅立叶变换与频谱分析”,突出介绍具有重要而且广泛应用价值的傅立叶频谱分析,详细分析介绍了频谱的概念以及频谱分析的应用。

(2) 从第2章到第6章,每章的最后一节通过一些简化的具体应用例子介绍了该章内容的实际应用,以便读者了解相关理论的实际应用价值,培养运用所学知识处理实际问题的能力。

(3) 第3章在介绍离散傅立叶变换之后增加了“短时傅立叶变换分析”一节,使读者增加对实际应用中大量非平稳信号的认识以及掌握相应的短时傅立叶变换分析技术。

(4) 第5章 FIR 滤波器的设计通过大量例子详细说明了各种设计方法的运用,特别重点介绍了利用凯泽(Kaiser)窗设计各种线性相位 FIR 滤波器的方法。

(5) 介绍了目前得到广泛应用的多分辨率信号处理,包括多采样率信号处理和小波变换分析,便于读者了解和掌握一些新的信号处理内容。

(6) 考虑到实际应用中所处理的信号一般为随机信号,设置了“离散随机信号处理”一章对随机信号的一些基本特征进行分析和描述,使读者进一步认清实际应用中数字信号处理的具体对象及其特点。

(7) 考虑到前期课程“信号与线性系统”一般已对离散信号和系统进行了一定程度的介绍,因此将 Z 变换合并到第1章。另外,由于目前计算机和各种微处理器的字长都在16位以上,有限字长效应已不像从前那样突出和敏感,因此,相应内容不再单独列章,而是分散到相关章节中介绍,并着重概念的理解。

(8) 第1至第5章都配有相应的实验指导,实验内容以具体应用实例的抽象形式给出,以巩固课堂教学内容,培养学生观察分析问题以及运用所学知识解决问题的能力。

本书适合各类高等院校电子信息工程、通信工程、自动控制工程和生物医学工程等本科专业学生学习,也可以供研究生和相关专业领域的工程师和技术人员参考。本书的参考教学时数可根据具体情况选择以下两种方式:第一种方式是仅讲授前5章内容,课堂教学48学时,实验12学时;第二种方式是讲授全部内容,课堂教学60学时,实验12学时。教学中应该把重点放在物理概念和工程含义的透彻分析与介绍上,避免变成工程数学课,同时适当安排习题课,加强实验环节。

本书第2、3、5、6章,第4章4.6节、4.7.2小节和绪论部分由俞一彪撰写,第1、4章由孙兵撰写,第7章由吕建平撰写,全书由俞一彪统稿。在写作过程中,东南大学的吴镇扬教授和南京大学的方元副教授对一些具体问题提出了宝贵的建议,研究生何松完成了实验部分的验证工作,袁冬梅、颜祥、戴志强验证了部分习题,在此一并表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限,写作时间较短,书中可能存在某些缺陷和错误,敬请广大读者批评指正。E-mail:yuyb@suda.edu.cn。

如果读者需要本书电子版和相关课件,请到以下网址下载:www.sudadz.com。

俞一彪

2005年5月

目 录

绪 论	(1)
1 离散时间信号与系统	(4)
1.1 连续时间信号的采样与量化	(4)
1.1.1 连续信号的采样	(4)
1.1.2 采样前后频谱的变化	(5)
1.1.3 量化	(7)
1.1.4 从采样信号恢复连续信号	(7)
1.2 离散时间信号——序列	(10)
1.2.1 典型的序列	(10)
1.2.2 周期序列	(12)
1.2.3 序列的运算	(14)
1.2.4 线性卷积	(16)
1.2.5 序列的分解	(18)
1.2.6 序列的能量	(18)
1.2.7 多维序列	(18)
1.3 离散时间系统	(19)
1.3.1 离散时间系统的类型	(19)
1.3.2 离散时间系统的描述	(22)
1.4 Z 变换	(24)
1.4.1 Z 变换的定义及其收敛域	(25)
1.4.2 典型序列的 Z 变换	(27)
1.4.3 逆 Z 变换	(29)
1.4.4 Z 变换的性质	(32)
1.4.5 Z 变换与拉普拉斯变换的关系	(36)
1.5 离散时间系统的 Z 变换分析法	(37)
1.5.1 系统函数	(38)
1.5.2 逆系统	(40)
1.5.3 因果稳定系统的 Z 变换分析	(40)
1.5.4 离散时间系统的信号流图描述	(41)
1.6 本章小结	(42)
习题	(42)

实验 离散时间信号与系统分析	(46)
2 傅立叶变换与频谱分析	(48)
2.1 离散信号的傅立叶变换	(48)
2.1.1 离散信号傅立叶变换的定义	(48)
2.1.2 离散信号的傅立叶反变换	(50)
2.1.3 离散信号的傅立叶变换与 Z 变换的关系	(51)
2.2 离散信号傅立叶变换的特点	(51)
2.2.1 对称特征	(51)
2.2.2 周期特征	(51)
2.2.3 线性特征	(52)
2.2.4 卷积特性	(52)
2.2.5 帕斯维尔定理	(53)
2.3 线性移不变系统的频率响应	(53)
2.4 系统函数零极点与频率响应的关系	(55)
2.5 离散信号频谱与模拟信号频谱之间的关系	(57)
2.5.1 模拟信号的傅立叶变换	(57)
2.5.2 离散时间傅立叶变换的导出	(58)
2.5.3 DTFT 与 FT 的关系	(59)
2.6 频谱分析及应用	(61)
2.6.1 信号频谱的基本特征	(61)
2.6.2 系统频谱的基本特性	(64)
2.6.3 信号调制与解调	(64)
2.6.4 语音合成	(66)
2.6.5 图像增强	(67)
2.7 短时傅立叶变换分析	(68)
2.7.1 短时傅立叶变换的定义	(69)
2.7.2 短时傅立叶变换的特性	(69)
2.7.3 短时频谱的一种表示	(72)
2.8 本章小结	(72)
习题	(73)
实验 离散信号频谱分析与应用	(76)
3 离散傅立叶变换与快速算法	(79)
3.1 周期信号的离散傅立叶级数表示	(79)
3.1.1 离散傅立叶级数	(79)
3.1.2 周期卷积	(81)
3.2 离散傅立叶变换	(83)

3.2.1 离散傅立叶变换的定义	(83)
3.2.2 离散傅立叶反变换	(86)
3.3 离散傅立叶变换的特性	(87)
3.3.1 有限长特性与频域采样定理	(87)
3.3.2 循环卷积特性	(89)
3.4 频率分辨率与时间分辨率	(91)
3.4.1 频率分辨率	(91)
3.4.2 时间分辨率	(93)
3.4.3 频率分辨率与时间分辨率的关系与协调	(93)
3.5 快速傅立叶变换	(95)
3.5.1 基于时选的快速傅立叶变换	(96)
3.5.2 基于频选的快速傅立叶变换	(98)
3.5.3 同址计算问题	(100)
3.5.4 离散傅立叶反变换的快速计算	(101)
3.6 离散傅立叶变换的应用	(101)
3.6.1 信号去噪	(101)
3.6.2 语音识别	(103)
3.6.3 图像纹理处理	(105)
3.6.4 利用 FFT 计算线性卷积	(106)
3.7 本章小结	(109)
习题	(109)
实验 基于 DFT 的信号识别系统	(111)
4 无限脉冲响应数字滤波器设计	(113)
4.1 数字滤波器的性能指标	(113)
4.2 IIR 数字滤波器的结构	(115)
4.2.1 直接 I 型	(115)
4.2.2 直接 II 型	(116)
4.2.3 级联型	(116)
4.2.4 并联型	(117)
4.2.5 全通滤波器	(118)
4.3 IIR 滤波器的特性	(119)
4.3.1 巴特沃兹滤波器	(119)
4.3.2 切比雪夫滤波器	(121)
4.3.3 椭圆滤波器	(123)
4.4 模拟滤波器到数字滤波器的转换	(123)
4.4.1 脉冲响应不变法	(124)

4.4.2 双线性变换法	(126)
4.5 IIR 滤波器设计的频率变换方法	(129)
4.5.1 模拟低通滤波器到各种数字滤波器的变换	(130)
4.5.2 数字低通滤波器到其他滤波器的变换	(134)
4.6 IIR 滤波器实现与系数量化效应	(137)
4.6.1 IIR 滤波器的实现	(137)
4.6.2 系数量化效应	(138)
4.7 IIR 滤波器应用	(139)
4.7.1 彩色 B 超系统中的壁滤波器	(139)
4.7.2 DTMF 双音频信号的合成	(141)
4.8 本章小结	(142)
习题	(143)
实验 IIR 滤波器的设计	(144)
5 有限脉冲响应数字滤波器设计	(145)
5.1 FIR 数字滤波器的特点	(145)
5.1.1 基本特点	(145)
5.1.2 线性相位特点	(146)
5.1.3 线性相位 FIR 滤波器的实现条件	(147)
5.2 窗函数设计法	(149)
5.2.1 窗函数设计法原理	(149)
5.2.2 理想低通滤波器	(150)
5.2.3 矩形窗的设计特性	(151)
5.2.4 汉宁窗的设计特性	(152)
5.2.5 哈密窗的设计特性	(153)
5.2.6 布莱克曼窗的设计特性	(154)
5.2.7 凯泽窗的设计特性	(155)
5.2.8 窗函数设计法的进一步分析	(156)
5.3 利用凯泽窗设计 FIR 滤波器	(158)
5.3.1 低通滤波器设计	(158)
5.3.2 带通滤波器设计	(159)
5.3.3 高通滤波器设计	(161)
5.3.4 带阻滤波器设计	(163)
5.4 频率取样设计法	(165)
5.4.1 频率取样设计法原理	(165)
5.4.2 设计实例分析	(166)
5.5 等波纹逼近优化设计方法	(169)

5.5.1 最小均方误差优化设计	(169)
5.5.2 等波纹逼近优化设计	(169)
5.6 系数量化效应与溢出控制	(172)
5.6.1 系数量化效应	(172)
5.6.2 溢出控制	(173)
5.7 FIR 滤波器应用	(174)
5.7.1 信号去噪	(174)
5.7.2 信号的高频提升	(175)
5.7.3 图像去噪	(177)
5.8 本章小结	(177)
习题	(177)
实验 FIR 滤波器设计与实现	(180)
6 多采样率信号处理与小波变换	(182)
6.1 多采样率信号处理	(182)
6.1.1 序列的抽取与插值	(182)
6.1.2 序列的采样率降低处理	(184)
6.1.3 序列的采样率提升处理	(185)
6.2 多采样率处理的应用	(186)
6.2.1 带通信号的降采样处理	(186)
6.2.2 正交镜像滤波器组设计	(188)
6.2.3 树结构正交镜像滤波器组设计	(190)
6.2.4 倍频程分隔滤波器组设计	(191)
6.2.5 子带数据压缩编码	(192)
6.3 小波变换	(192)
6.3.1 连续小波变换	(193)
6.3.2 小波变换的时频特性	(194)
6.3.3 二进小波变换	(195)
6.3.4 多分辨率分析	(195)
6.3.5 Mallat 算法	(197)
6.4 小波变换应用	(199)
6.4.1 离散小波变换的计算	(199)
6.4.2 信号去噪处理	(201)
6.4.3 图像数据压缩	(202)
6.4.4 语音信号基音检测	(203)
6.5 本章小结	(204)
习题	(205)

7	离散随机信号处理	(207)
7.1	随机变量和随机过程	(207)
7.2	平稳随机信号	(209)
7.3	随机信号的 A/D 转换噪声和过采样处理	(214)
7.4	随机信号功率谱	(216)
7.5	线性系统对随机信号的响应	(220)
7.5.1	均值	(221)
7.5.2	自相关函数及功率谱	(221)
7.5.3	互相关函数和互功率谱密度	(222)
7.6	功率谱估计	(223)
7.6.1	谱估计方法种类	(224)
7.6.2	自相关函数的估计	(224)
7.6.3	互相关函数的估计	(225)
7.6.4	传统功率谱估计	(226)
7.6.5	模型谱估计	(229)
7.6.6	AR 谱估计	(233)
7.6.7	最大熵谱估计	(235)
7.6.8	Burg 谱估计法	(237)
7.6.9	阶数的确定	(238)
7.7	维纳滤波与卡尔曼滤波	(239)
7.8	本章小结	(243)
	习题	(243)
	附录 专业术语英汉对照	(246)
	参考文献	(251)

绪 论

自从 20 世纪 60 年代中期 Cooley 和 Tukey 提出快速傅立叶变换算法以来,随着信息科学与计算机技术的不断发展,数字信号处理(DSP: Digital Signal Processing)逐渐成为一门具有丰富研究领域和完整理论体系的新兴学科,在通信、控制、消费电子、国防军事、医疗等领域得到了广泛的应用,已经成为整个数字技术的基础。

一、信号、系统及信号处理

信号是承载、传输信息的媒介或者物理表示,它随时间或空间的变化而变化,是可测量的。通俗地讲,信号就是消息,而信息是包含在信号或消息中的未知内容。例如,上面这段文字就是信号,而其所表达的意思就是信息。信号可以按照不同的性质进行分类。例如,按照维数可以将语音信号划分为一维信号,而图像信号是二维信号。按照周期特征又可以分为周期和非周期信号。但从信号处理的角度,一般将信号分为模拟信号、离散信号和数字信号三大类。

(1) 模拟信号:信号随时间(空间)连续变化,并且幅度值取自连续数据域。自然界中大部分信号是模拟信号。

(2) 离散信号:信号随时间(空间)以一定规律离散变化,幅度值取自连续数据域。自然界中这样的信号很少,一般通过对模拟信号的采样形成。

(3) 数字信号:信号随时间(空间)以一定规律离散变化,并且幅度值取自以二进制编码的离散数据域,一般可通过对离散信号进行量化得到。

数字信号处理中,一般通过 A/D(模拟—数字)转换器实现模拟信号 $x(t)$ 的采样,将模拟信号转换成离散信号 $x(n) = x(nT)$,并进一步量化编码形成计算机、DSP 处理器等数字处理系统能接受和处理的数字信号 $x_d(n)$,如图 1 所示。因为模拟信号连续地取值意味着任何一个时间(空间)区域存在无穷多个信号值,不可能被有限容量存储器所存储,而且,模拟信号幅度取值的连续性同样意味着需要无穷个不同的符号来描述信号,对数字处理系统来说这也是不可能的。因此,数字信号处理的前提是处理对象必须是数字信号。

系统是对信号进行某种处理的物理设备,它往往由若干不同功能的子系统构成。系统一般有输入信号,并通过对它处理形成输出信号,这种关系使得系统往往可以用一个函数来描述,自变量为输入信号,函数值为输出信号。系统本质上代表了某种处理,一般可以划分为模拟系统、离散系统和数字系统三种形式。

(1) 模拟系统:输入与输出信号都是模拟信号。这种系统一般由硬件来实现。

(2) 离散系统:输入与输出信号都是离散信号。这种系统一般仅仅用于理论分析。

(3) 数字系统:输入与输出信号都是数字信号。例如,计算机、DSP 处理器等系统。

数字信号处理系统并不是孤立的数字系统,一般是以数字处理系统为核心,结合 A/D 和 D/A(数字—模拟)转换器、滤波和放大器等子系统构成,如图 1 所示。

放大器完成对原始信号 $x_a(t)$ 的放大,使其幅度与 A/D 转换器的输入信号范围相匹配。前置低通滤波器将信号中大于 $1/2$ 采样频率的高频分量过滤掉,防止采样时出现频谱混叠

现象。采样得到的离散信号 $x(n)$ 在图中用圆圈表示, 量化后(图中假设 3 比特量化)每个离散信号值被数字编码, 形成数字信号 $x_d(n)$ 并由 3 位二进制码表示。数字处理系统的输出信号 $y_d(n)$ 经过 D/A 转换形成有跳变的模拟信号 $y(t)$, 必须通过平滑滤波器将信号变成平滑的连续信号 $y_a(t)$ 。

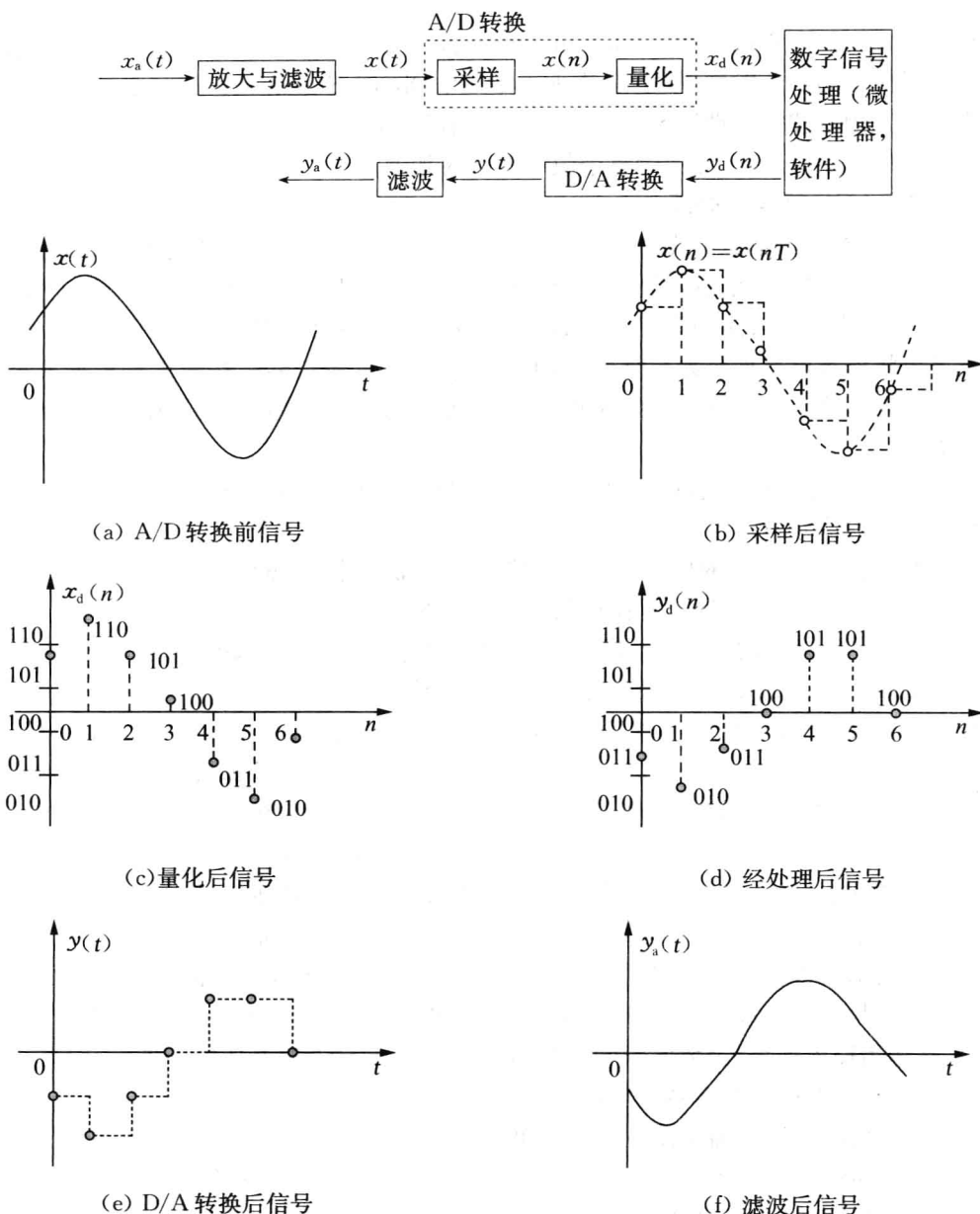


图 1 典型数字信号处理系统及各信号波形

信号处理是对信号进行运算、变换, 提取有用信息的过程, 处理内容主要包括滤波、变换、频谱分析、压缩、识别与合成等。数字信号处理过程必定涉及数字化处理系统, 由数字化处理器或程序完成对数字信号的处理。

二、数字信号处理的特点

如前所述,数字处理系统只能直接处理数字信号,模拟信号必须先转化成数字信号后才能被数字化处理。可是,采样和量化看起来会引起信号一定程度上的失真,从而产生一个问题,即信号的数字化处理值得吗?答案是肯定的。因为信号本身具有一定的信息冗余,只要采样频率足够高(满足奈奎斯特定理),量化位足够多,采样和量化就不会使信号在时域和频域引起失真。而且,数字化处理带来的好处有很多。

(1) 软件可实现:纯粹的模拟信号处理必须完全通过硬件实现,而数字化处理则不仅可以通过微处理器、专用数字器件实现,而且可以通过程序的方式实现。软件可实现特性带来的好处之一是处理系统能进行大规模的复杂处理,而且占用空间极小。

(2) 灵活性强:模拟信号处理系统调试和修改不便,而数字处理系统的系统参数一般保存在寄存器或存储器中,修改这些参数对系统进行调试非常简单,软件实现时尤其如此。由于数字器件以及软件的特点,数字信号处理系统的复制也非常容易,便于大规模生产。

(3) 可靠性高:模拟器件容易受电磁波、环境温度等因素影响,模拟信号连续变化,稍有干扰立即反映。而数字器件是逻辑器件,数字信号由“0”和“1”构成的二进制表示,一定范围的干扰不会引起数字值的变化,因此,数字信号处理系统的抗干扰性能强,可靠性高,数据的保存也能永久稳定。

(4) 精度高:模拟器件的数据表示精度低,难以达到 10^{-3} 以上,而数字信号处理器和数字器件目前可以实现 64 比特的字长,表达数据的精度可以达到 10^{-18} 以上。

数字化处理的最大的特点应该是大量复杂的处理都可以用软件来实现,这样的软件可以在计算机上运行,也可以在 DSP 微处理器上运行,因此,系统的体积缩小了,可靠性、稳定性提高了,调试和改变系统功能变得方便了。这些就是为什么移动电话等通信电子产品功能越来越丰富、性能越来越高,而体积越来越小的原因。

三、数字信号处理的应用

数字信号处理是数字通信、数字控制和信息处理的技术基础,并在很多领域都得到了广泛的应用,从行业来讲几乎可以涵盖工业、农业、医疗、国防和消费等各个行业。

(1) 数字通信

数字通信中信号的编解码、调制以及抗干扰等方面都采用数字信号处理技术来实现,目前的程控交换机、无线基站和终端、数字广播和接收设备等都广泛采用了数字信号处理技术,并且还能实现保密和隐秘通信。

(2) 数字控制

采用数字信号处理技术的数字控制不仅控制精度高,而且控制手段更加灵活,并能实现复杂的控制。例如,采用 PLC 可编程控制方法可以实现模拟控制无法实现或难于实现的控制,并可方便地实现变速变轨等复杂动作。

(3) 信息处理

数字信号处理技术能够使人与机器的语音对话成为可能,让机器识别具体的人和物体,从大量分散复杂的数据中挖掘有意义的数据等。例如,语音与说话人识别系统、雷达目标识别系统、计算机断层扫描成像和地震勘探等。

目前,数字化、信息化已经深入到每一个社会领域,而数字信号处理理论是整个数字化技术的基础。

1 离散时间信号与系统

- 模拟信号的采样与量化:奈奎斯特(Nyquist)采样定理
- 线性系统、移不变系统、平稳系统、因果系统、IIR、FIR
- 线性卷积与差分方程
- Z 变换、系统函数

离散时间信号在时域离散分布,表现为一个离散时间序列。可以通过对连续信号取样获得离散信号,并经过量化编码形成数字信号。离散系统对离散信号进行处理并输出另一个离散信号。

本章介绍离散时间信号和系统的表示及基本特性。主要内容包括:(1) 连续信号的采样和量化;(2) 离散信号的描述和特性分析;(3) 离散时间系统的描述和特性分析;(4) Z 变换。这一章提出了一些重要的概念,例如,单位脉冲响应、线性卷积、系统函数和常系数差分方程等。同时,关于系统的介绍部分对各种不同的系统进行了分析,对线性移不变系统、稳定系统、因果系统的定义进行了说明,对无限脉冲响应系统(IIR: Infinite Impulse Response)和有限脉冲响应系统(FIR: Finite Impulse Response)在系统函数和差分方程表示上的特征和区别进行了分析。

1.1 连续时间信号的采样与量化

大多数离散时间信号是对连续时间信号的采样。把模拟信号转换为数字形式的过程称为模拟—数字转换(A/D 转换: Analog to Digital Conversion),其相反过程是将数字信号转换成模拟信号,称为数字—模拟转换(D/A 转换: Digital to Analog Conversion)。

1.1.1 连续信号的采样

采样可以看作对信号进行数字化处理的第一环节。信号的采样由采样器来进行,采样

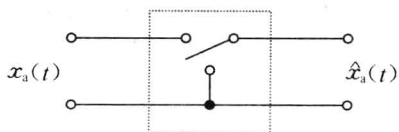
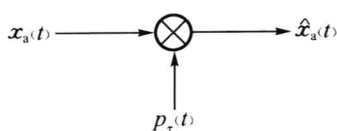


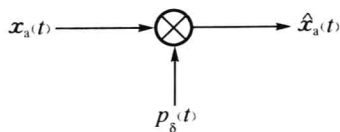
图 1.1 采样电路

器就像一个电子开关,如图 1.1 所示, $x_a(t)$ 为输入的连续时间信号, $\hat{x}_a(t)$ 为采样后的离散时间信号。

对连续时间信号的采样有很多方法,其中最常见的是等间隔采样,即每隔时间 T_s ,电子开关闭合一次,闭合持续时间为 $\tau \ll T_s$,则在电子开关的输出端得到对 $x_a(t)$ 的采样信号 $\hat{x}_a(t)$ 。这种开关的作用等同于乘法器,采样信号 $\hat{x}_a(t)$ 就是 $x_a(t)$ 与开关函数 $p_\tau(t)$ (实际采样)相乘或 $x_a(t)$ 与开关函数 $p_\delta(t)$ (理想采样)相乘的结果,若 $\tau \approx 0$,则实际采样即为理想采样,如图 1.2 和图 1.3 所示。

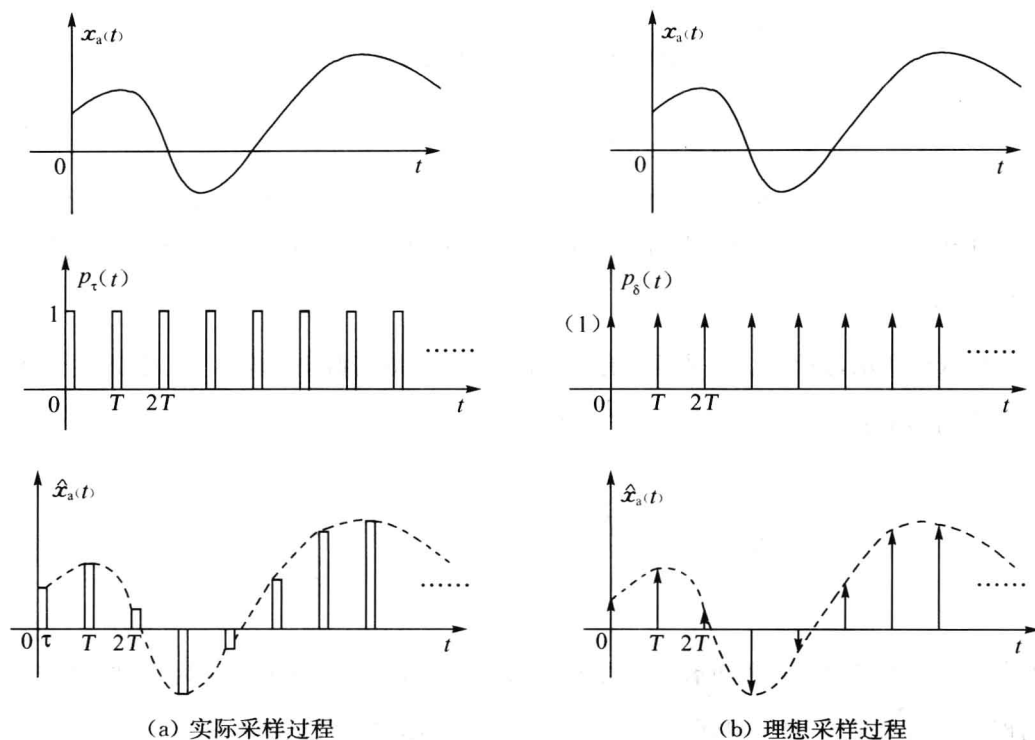


(a) 实际采样模型



(b) 理想采样模型

图 1.2 采样模型



(a) 实际采样过程

(b) 理想采样过程

图 1.3 连续时间信号的采样

下面讨论理想采样的过程, 周期性的单位冲激函数 $p_\delta(t)$ 表示为

$$p_\delta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s) \quad (1.1)$$

式中, 采样间隔即采样周期为 T_s , 采样频率 $f_s = \frac{1}{T_s}$, 采样角频率 $\Omega_s = \frac{2\pi}{T_s}$ 。则

$$\hat{x}_a(t) = x_a(t)p_\delta(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a(nT_s)\delta(t - nT_s) \quad (1.2)$$

1.1.2 采样前后频谱的变化

理想采样前后信号的频谱会发生变化。用 $\text{FT}[\cdot]$ 表示傅立叶变换, 设 $X_a(j\Omega) = \text{FT}[x_a(t)]$, $P_\delta(j\Omega) = \text{FT}[p_\delta(t)]$, $\hat{x}_a(j\Omega) = \text{FT}[\hat{x}_a(t)]$ 。由于

$$P_\delta(j\Omega) = \text{FT}[p_\delta(t)] = 2\pi \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n \delta(j\Omega - jn\Omega_s) \quad (1.3)$$

其中