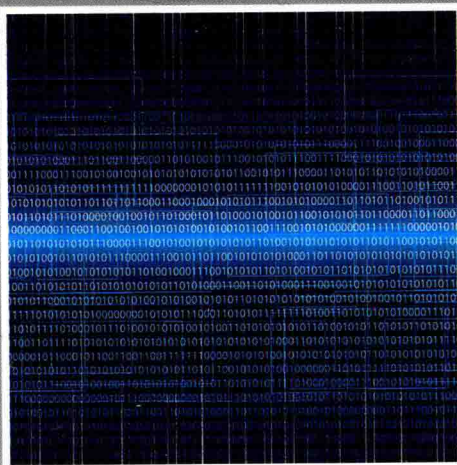


现代数字信号处理

关键技术研究

王洪雁 裴腾达 著

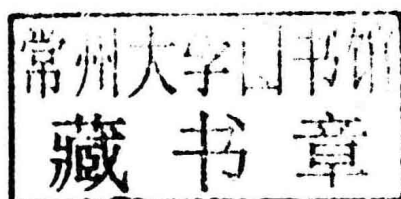


中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

现代数字信号处理

关键技术研究

王洪雁 裴腾达 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

• 北京 •

内 容 提 要

数字信号处理是一门应用十分广泛的基础学科,随着数字信号处理学科理论和方法的发展,其覆盖领域越来越广。

本书在现代数字信号处理概述的基础之上,系统地讨论了离散时间信号与系统、变换方法、数字滤波器的结构与分析、平稳随机信号处理及信号模型、功率谱估计和信号频率估计方法,并对数字信号处理的 DSP 实现方法进行了详尽的阐述。

本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,可供从事数字信号处理方面的科研技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

现代数字信号处理关键技术研究 / 王洪雁, 裴腾达
著. —北京: 中国水利水电出版社, 2017. 7

ISBN 978-7-5170-5700-0

I. ①现… II. ①王… ②裴… III. ①数字信号处理
—研究 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 185376 号

书 名	现代数字信号处理关键技术研究 XIANDAI SHUZI XINHAO CHULI GUANJIAN JISHU YANJIU
作 者	王洪雁 裴腾达 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@ waterpub. com. cn 电话: (010)68367658(营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京亚吉飞数码科技有限公司
印 刷	三河市天润建兴印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 15.25 印张 273 千字
版 次	2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	65.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

数字信号处理是一门应用十分广泛的基础学科,随着数字信号处理学科理论和方法的发展,其覆盖领域越来越广,涉及专业越来越多,包括通信工程、电子科学与技术、测控技术与仪器、计算机科学与技术、电子信息科学与技术、电子信息工程、自动化等,已然成为一门重要的学科与技术。

很多人认为数字信号处理主要是研究有关数字滤波技术、离散变换快速算法和谱分析方法的一门学科。但事实上,数字信号处理的问题已无处不在。数字信号处理是研究用数字方法对信号进行分析变换、滤波、检测、调制、解调以及快速算法的一门技术学科。该技术学科已经渗透到所有现代自然科学和社会科学领域,并依靠它独特的优势发挥着重大作用。

作者依据现代信号与信息处理技术的发展和行业需求,对本书进行了精心编排。本书在写作上力求言简意赅,遵循由浅入深的学习过程,系统地讨论数字信号处理的基本原理、基本分析方法、基本算法以及基本实现方法,以期能够更好地为数字信号处理的未来发展尽一份微薄之力。

本书的指导思想新颖,内容创新,能适应当代科技发展的需求,简单来说,本书主要体现了以下几点:

①注重基础,重视概念与性质的分析。本书详细讨论了信号的抽取、插值,信号的多相表示,抽取、插值的实现等基本问题。围绕根本问题进行深入剖析,强调滤波器的性质以及其设计与实现方法,用最基本的方法逐步深入解决问题。

②联合分析。本书在时间和频率问题上,用时频联合分析的主要思想对信号进行剖析,力图将描述信号的两个最重要的物理量结合在一起进行分析和处理。运用大量实例,采用归纳总结的方法,帮助读者强化记忆。

③接触前沿。在数字信号方面,世界前沿知识更新较快,为了能够与时俱进,本书在知识体系方面适当地介绍有关方面的前沿知识,使读者在接受基础知识的同时接触到前沿知识,为以后的深入学习打下基础。

本书分8章,不仅详尽阐述了离散时间信号与离散时间系统,而且对时

域离散信号的变换方法也进行了深入分析与研究。书中将平稳随机信号处理与信号模型巧妙地融合在一起进行深入分析,这是本书的一大特色。体现了用信号模型解决随机信号问题,是随机信号问题处理的一大重要方法。另外,本书还将功率谱估计和信号频率估计结合到一起进行研究,其内容包含自相关函数估计、经典功率谱估计和现代功率谱估计等,大大方便了相关问题的解决。

本书试图将线性预测与自适应滤波的原理融入到其相关应用中进行阐述,多用总结对比的方案帮助读者理解记忆,即运用对比分析和总结的方法,使读者能够迅速进入理解和掌握的阶段,从而获得更多有关现代数字信号处理技术的能力,这也是本书最大的亮点。

此外,为了加深读者对基本理论和方法的理解,并进一步开阔眼界,本书在内容上进行了大胆的创新,以数字信号处理基本知识、基本理论为主线,由浅入深、推导严谨。对相关专业的工程技术人员来说,实乃一本有益的参考书。

现代数字信号处理涉及面广,本书在撰写过程中参考并引用了大量前辈学者的研究成果和论述,在此作者向这些学者表达诚挚的敬意和谢意。

由于时间仓促,作者水平有限,本书难免存在错误、疏漏之处,恳请广大读者批评指正,不吝赐教。

作 者

2017 年 4 月

目 录

前言

第 1 章 现代数字信号处理概论	1
1.1 数字信号处理的主要内容与特点	1
1.2 数字信号处理的一般实现方法	3
1.3 数字信号处理的应用领域	4
1.4 数字信号处理器	7
第 2 章 离散时间信号与离散时间系统	10
2.1 离散时间信号	10
2.2 离散时间系统	28
2.3 线性常系数差分方程及其求解	33
2.4 模拟信号数字处理方法及相关转换	35
第 3 章 时域离散信号的变换方法	43
3.1 离散时间傅里叶变换	43
3.2 时域离散信号的 Z 变换	45
3.3 离散傅里叶变换及其应用	52
3.4 快速傅里叶变换	73
第 4 章 数字滤波器的结构与分析	81
4.1 数字系统的信号流图表示方法	81
4.2 IIR 数字滤波器的基本结构与特点	84
4.3 FIR 数字滤波器的基本结构与特点	91
4.4 数字滤波器的格型结构	100
4.5 数字信号处理中的量化效应	106
第 5 章 平稳随机信号处理及信号模型	112
5.1 随机信号及其处理	112

5.2	平稳随机过程的自相关矩阵及其性质	116
5.3	平稳随机信号的描述	122
5.4	随机序列数字特征的估计	126
5.5	线性系统对随机信号的响应	132
5.6	随机过程高阶累积量和高阶谱的概念	134
第 6 章	功率谱估计和信号频率估计方法	139
6.1	经典功率谱估计的方法及其改进	139
6.2	AR 模型功率谱估计的方法和性质	146
6.3	最大熵谱估计方法	155
6.4	其他谱估计方法	156
6.5	基于相关矩阵特征分解的信号频率估计	159
6.6	谱估计的应用实例	163
第 7 章	线性预测与自适应滤波	170
7.1	维纳滤波原理	170
7.2	维纳滤波器的最陡下降求解方法	175
7.3	LMS 算法	180
7.4	维纳滤波在线性预测中的应用	185
7.5	卡尔曼滤波	189
7.6	卡尔曼滤波的方法与公式	191
7.7	自适应滤波器的应用	194
第 8 章	数字信号处理的 DSP 实现方法	200
8.1	IIR 滤波器的 DSP 实现	200
8.2	FIR 滤波器的 DSP 实现	209
8.3	快速傅里叶变换的 DSP 实现	215
8.4	信号压缩编码的 DSP 实现	219
8.5	数字基带信号的 DSP 实现	221
8.6	自适应滤波器的 DSP 实现	225
参考文献		230
索引		236

第 1 章 现代数字信号处理概论

数字信号处理(Digital Signal Processing)是一门新兴学科,它研究用数字方式进行信号处理,即利用数字计算机或专用数字处理设备对信号进行分析、变换、综合、滤波、估计与识别等处理。

1.1 数字信号处理的主要内容与特点

1.1.1 为什么要处理数字信号

计算机是基于二进制设计的,它只能处理“0”和“1”组成的代码,这些代码是离散的,而日常生活中人们所感知的信号大多是模拟的。因此,利用计算机处理模拟信号时,必须先把它转换为离散的数字信号,然后才能输入计算机进行处理。输出时再把经过 DSP 处理的数字信号转换为模拟信号。

1.1.2 数字信号处理的内容

数字信号处理涉及的内容非常广泛。数字信号处理的内容如图 1-1 所示。

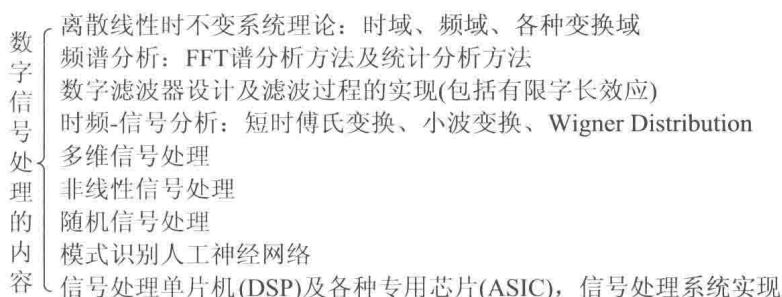


图 1-1 数字信号处理的内容

1.1.3 数字信号处理的学科概貌

数字信号处理的学科概貌如图 1-2 所示。其中,离散时间线性时(移)不变系统理论和离散傅里叶变换是数字信号处理领域的理论基础。而数字滤波和频谱分析是数字信号处理理论的两个主要学科分支。

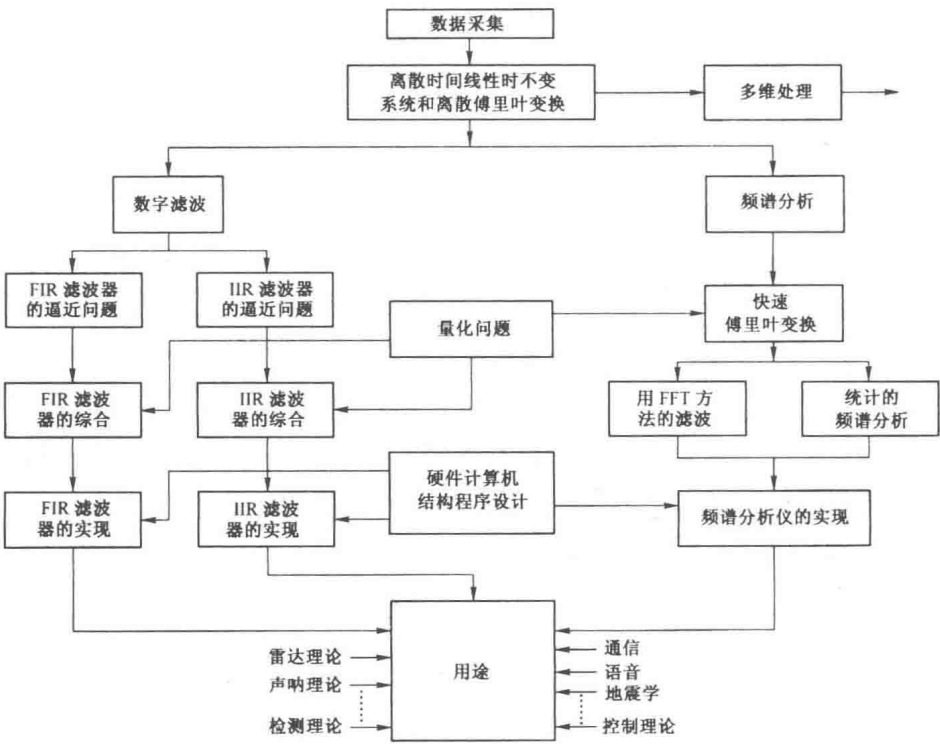


图 1-2 数字信号处理的学科概貌

1.1.4 数字信号处理的特点

与模拟信号处理系统相比,数字信号处理系统具有以下优点。

- (1)精度高。
- (2)灵活性强。
- (3)可靠性好。
- (4)容易大规模集成。
- (5)时分复用。
- (6)多维处理。

1.2 数字信号处理的一般实现方法

所谓数字信号处理的实现,是指将信号处理的理论应用于某一具体的任务中。随着任务的不同,数字信号处理实现的途径也不相同。数字信号处理的实现可以是软件程序,也可以是硬件器件,具体来说分成三种。

1.2.1 纯软件实现

通过编写软件程序在通用计算机上实现。该方法的优点是功能灵活,开发周期短;但缺点是处理速度慢。随着计算机的高速发展,一些以前不能用纯软件来实时实现的处理现在可以实时处理了,例如,VCD/DVD 的解码播放。我们对实时处理的定义是:系统必须在有限的时间内对外部的输入信号或外部需要的输出信号完成指定的处理,即信号处理的速度必须大于或等于信号更新的速度,另外从信号输入到处理完成之间的延迟必须足够小。DVD 的实时解码要求能达到连贯地观看节目的需要。一般来说,软件实现只适用于算法的仿真研究、教学实验和一些对处理速度要求较低の場合。

1.2.2 专用硬件实现

采用由加法器、乘法器和延迟器构成的数字电路来实现某种专用的处理功能。例如,快速傅里叶变换芯片、数字滤波器芯片和调制解调器等。这里提到的芯片称为专用 DSP 芯片(Digital Signal Processors,DSP),具有某种特定功能的软件算法被固化在芯片内,用户无须编程,只需给出输入数据,经过简单的芯片组合,就能在输出端得到结果。专用硬件实现的优点是处理速度快,缺点是功能固定不灵活,开发周期长,适用于要求高速实时处理の場合。

1.2.3 软硬件结合实现

采用通用单片机、通用可编程 DSP 或 FPGA 等可编程逻辑器件,加以软件编程来实现。

其中的通用 DSP 已成为通信、计算机、消费类电子产品等领域的基础

器件。通用 DSP 具有专为信号处理设计的硬件和指令,相比起通用计算机和单片机来,它在数字信号处理领域有自己的专长。下面介绍通用 DSP 的最主要的优点。首先它采用哈佛结构或改进的哈佛结构,能提高数据吞吐率。图 1-3 给出了通用计算机的冯·诺依曼结构和 DSP 的哈佛结构。图 1-3 (a)将数据和指令存储在同一个存储器中,统一编址,只有一套总线,取指令和存取数据不能同时进行。图 1-3(b)中的数据存储器 and 指令存储器是分开的,有两套独立的总线,可以同时存取操作数和取指令。除此之外,各种改进的哈佛结构还允许同时存取两个操作数和取指令。其次,针对数字信号处理中经常遇到的乘法累加运算,通用 DSP 配备了硬件乘法器和累加器,有专门的乘加指令,而不是像通用计算机和单片机那样采用加法器实现乘法运算。另外,针对 DSP 运算的特点,DSP 还有循环寻址和倒位序寻址等各种寻址方式。所以采用通用 DSP 的软硬件结合实现数字信号处理具有处理速度快的优点,再加上可通过改写软件程序来改变系统功能或更新换代,所以又具有功能灵活的优点。众所周知,通用 DSP 有 TI(Texas Instruments)公司的 TMSXX 系列和 ADI(Analog Devices, Inc.)的 ADSPXX 系列等。

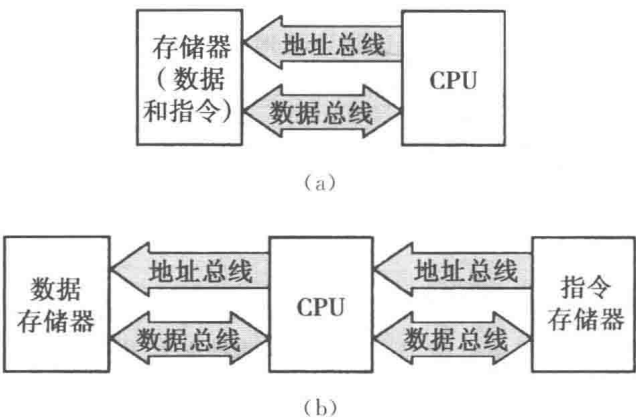


图 1-3 冯·诺依曼结构和哈佛结构
(a)冯·诺依曼结构;(b)哈佛结构

1.3 数字信号处理的应用领域

1.3.1 心电图信号

心电图信号是心脏活动情况的最直观反映。一个典型的心电图信号由

一系列不相同的“波组”构成,如图 1-4 所示。通常一个心动周期包括 P 波、P-R 间期、QRS 波群、S-T 段、T 波、U 波。Q-T 间期各波及波段,代表着心房、心室各阶段的活动情况。心电图波形的每个部分为医生分析病人的心脏情况提供各种不同类型的信息。实际测量中,往往产生较强的工频干扰信号(图 1-5),这给医生的诊断带来一定困难。对心电图信号进行数据处理,就是要滤除干扰信号,提取心音信号特征参数,给医生诊断提供方便。

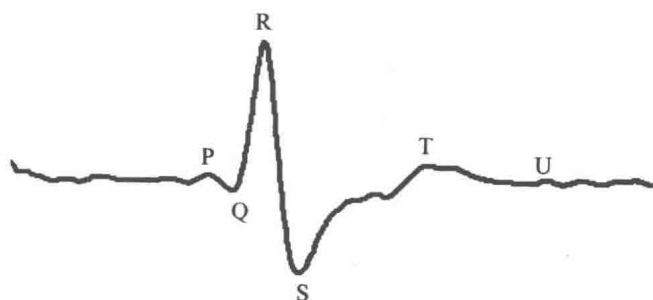


图 1-4 纯净心电信号的一个波组



图 1-5 某测量仪器获取的一个心电波组

1.3.2 语音信号

语音信号是一种有声的物理波形,它包括的信息有讲话的内容和讲话者,可以是孤立的单字,也可以是连续的词语。语音信号处理的目的是得到一些语音参数以便高效地传输或存储,或达到某种用途,如去除噪音,人工合成出语音,辨识出讲话者,识别出讲话内容等。语音信号处理是数字信号处理技术的一个典型应用。

如图 1-6(a)所示为某无线电台发出的一句呼叫语音信号时间波形,信号持续时间大约 2.3s。图 1-6(b)为同型号接收电台接收到的语音输出波形。由于信道及系统本身的干扰,接收信号中混杂着一种持续不断的啸叫干扰声,严重地影响了接收语音质量。图 1-6(c)是对图 1-6(b)进行增强后的信号,明显消除了干扰声,显著地改善了接收语音质量。对应原始语音

A 附近 40ms 语音片段,原始语音、带噪语音和增强语音的扩展波形分别如图 1-6 (d)、(e)、(f)所示。

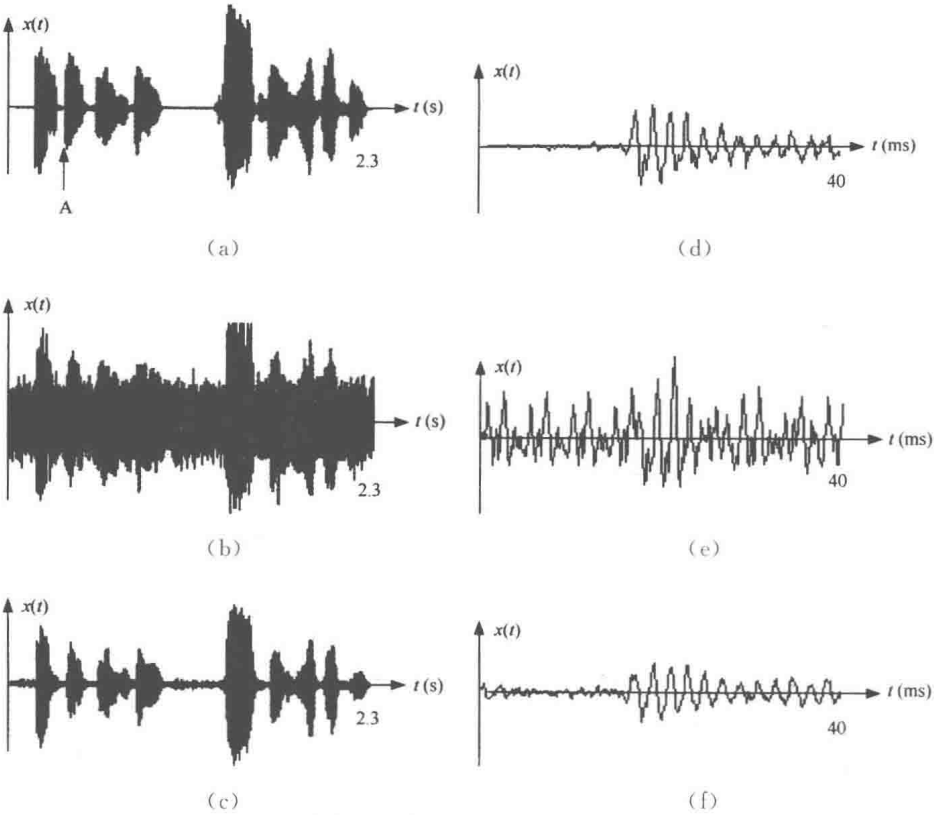


图 1-6 某电台语音时域波形

1.3.3 图像信号

图像处理科学对人类具有重要意义,是人们从客观世界获取信息的重要来源,是人类视觉延伸的重要手段。一幅图像是一个二维信号,它在任何点的强度是两个空间变量的函数。常见的例子有静态图像、雷达和声呐图像、医学图像等。图像处理过程实际上就是二维数字信号处理过程,主要包括图像增强、恢复、重建、分割、目标检测与识别以及编码等。作为一类信号处理技术,数字图像处理技术发展迅速,目前已成为工程学、计算机科学、信息科学、物理、生物学、医学等领域研究的对象,并在各个领域的应用取得了巨大的成功和显著的经济效益。

1.3.4 振动信号

机械振动信号的分析与处理技术已应用于汽车、飞机、船只、机械设备、房屋建筑、水坝设计等方面的研究和生产中。模态分析法,是数字信号处理在振动工程中应用的主要体现,例如,建筑结构的抗震性能分析就是利用模态分析法对结构进行动态优化设计。

1.4 数字信号处理器

1.4.1 数字信号处理系统的基本组成

通常,数字信号处理系统由 A/D 转换器、数字信号处理器、D/A 转换器三大部分组成,如图 1-7 所示。图 1-8 给出了图 1-7 中各有关信号的波形。整个系统的工作过程如下。

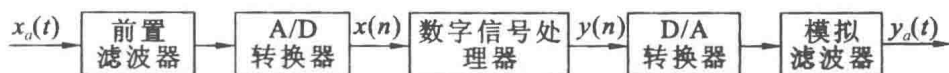


图 1-7 采样信号数字处理系统

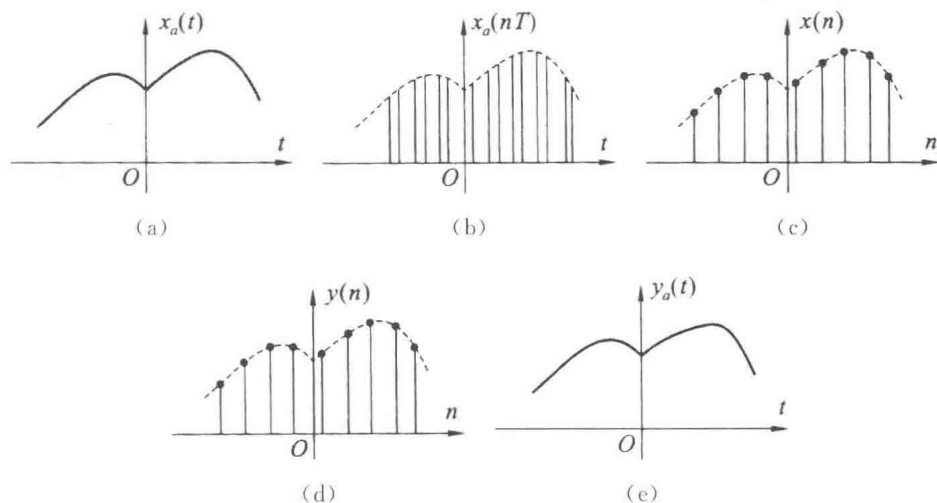


图 1-8 采样信号数字处理系统的信号波形

(1)为了避免采样出现频谱混叠现象,输入信号 $x_a(t)$ 先经过前置滤波器,将模拟信号 $x_a(t)$ 中的高于某一频率(折叠频率,等于采样频率的一半)的分量滤除。

(2)在 A/D 转换器中每隔 T 秒对 $x_a(t)$ [图 1-8(a)]进行一次采样,得到离散时间信号 $x_a(nT)$,如图 1-8(b)所示。然后在 A/D 转换器的保持电路中对采样信号进行量化,得到数字信号 $x(n)$,如图 1-8(c)所示。

(3)数字信号序列 $x(n)$ 通过数字信号处理系统的核心部分,即数字信号处理器,按照预定的要求进行加工处理,得到输出数字信号 $y(n)$,如图 1-8(d)所示。

(4) $y(n)$ 通过 D/A 转换器,将数字信号序列反过来转换为成模拟信号,得到的模拟信号通过一个模拟滤波器,滤除不需要的高频分量,将信号平滑成所需的模拟输出信号 $y_a(t)$,如图 1-8(e)所示。

1.4.2 数字信号处理技术

1.4.2.1 模拟信号与数字信号的关系

数字信号与连续时间信号的转换关系如图 1-9 所示。

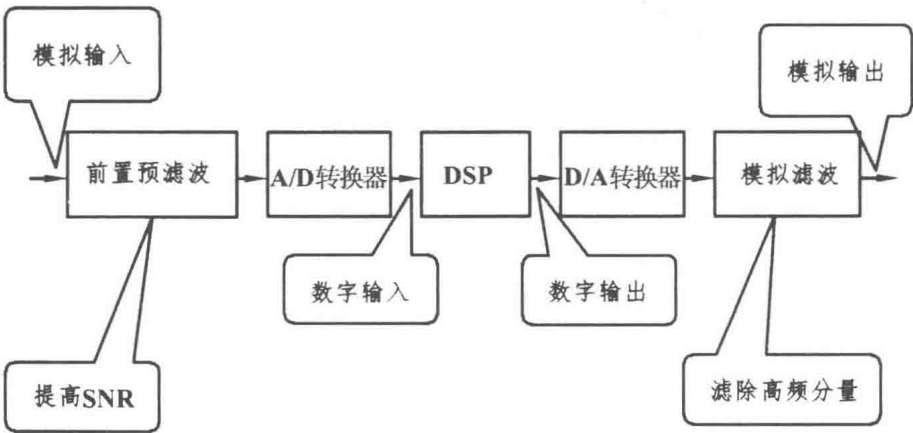


图 1-9 数字信号与连续时间信号的转换关系

数字信号与连续时间信号关系如图 1-10 所示。离散信号经过插值可以无失真地重构出模拟信号;用一个等间隔的取样冲激串函数可将模拟信号变为离散信号。

间隔时间 T 抽样示意图,如图 1-11 所示。抽样信号 $\hat{x}_a(t)$ 可以定义为用 T 为周期的冲激串函数 $p(t)$ 乘以 $x_a(t)$,其中

$$p(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$$

$$\hat{x}_a(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a(t) \delta(t - nT) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a(nT) \delta(t - nT)$$

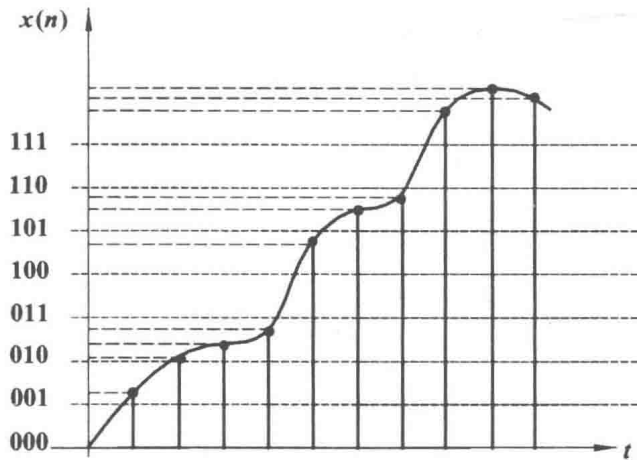


图 1-10 数字信号与连续时间信号的关系

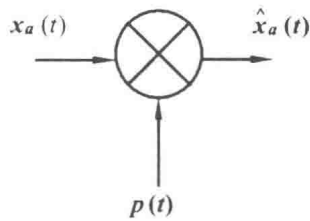


图 1-11 抽样示意图

1.4.2.2 A/D 变换的指标

经抽样后得到的是离散时间信号,若要得到数字信号,尚需进行量化编码。量化编码的性能由量化误差决定,信号处理的精度主要由信号的动态范围、信号的波形特点、量化位数和抽样频率决定。

第2章 离散时间信号与离散时间系统

信号通常分为两大类:连续时间信号和离散时间信号。如果信号在整个连续时间集合上都是有定义的,那么这种信号被称为连续时间信号。通常把时间连续、幅度也连续的信号称为模拟信号;把时间离散、幅度也离散的信号称为数字信号。

系统的作用是把信号变换成某种更合乎要求的形式。输入和输出都是连续时间信号的系统被称为连续时间系统;输入和输出都是离散时间信号的系统被称为离散时间系统;输入和输出都是模拟信号的系统被称为模拟系统;输入和输出都是数字信号的系统被称为数字系统。

本章主要讨论离散时间信号和离散时间系统的基本概念,重点研究线性时不变离散系统。首先介绍离散时间信号序列,然后分析线性时不变系统的特点及描述该系统的两种方法——离散卷积和常系数差分方程。

2.1 离散时间信号

在自然界中,大多数信号为连续信号,即信号的自变量为连续值,其函数值也是连续的,例如, $x_a = \sin(t)$ 表示一个正弦信号,它也是一个连续信号,如果对这个信号取样,每隔 T 时间间隔取一个点,这时,可表示成:

$$\begin{aligned}x_a(t) &= x_a(nT) \big|_{t=nT} = \sin(nT) \big|_{T=0.2} \\ &= \{0, 0.1987, 0.3894, 0.5646, 0.7174, 0.8415, \dots\} \quad T = 0.2\end{aligned}$$

上述信号,我们称为时域离散信号,即函数自变量为离散的信号。

假设将 $x_a(nT) \big|_{T=0.2}$ 的值用四位二进制数表示,便得到相应的数字信号,即

$$x(n) = x_a(nT) \big|_{T=0.2} = \{0.0000, 0.0100, 0.0110, 0.0111, 0.1000, \dots\}$$