



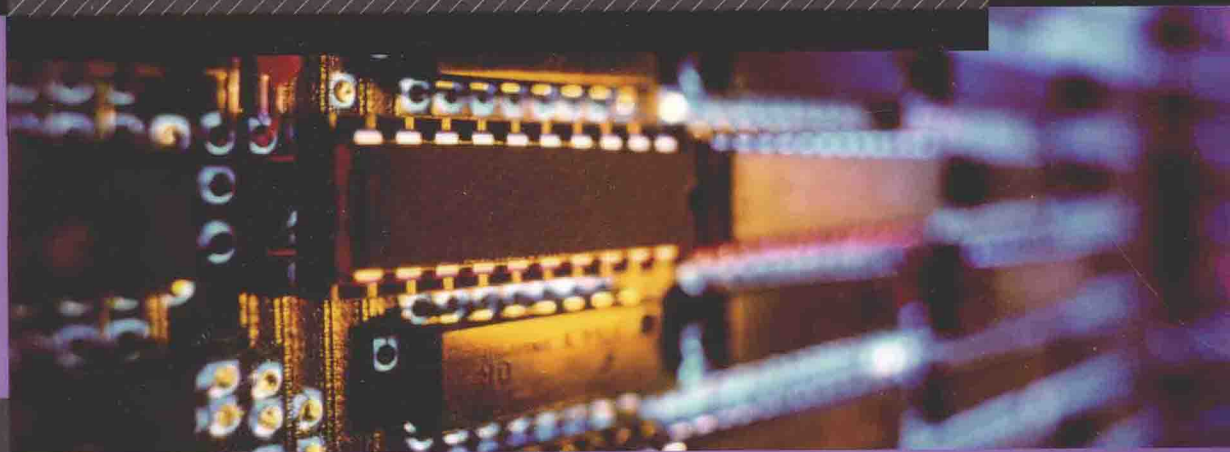
21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Digital Signal Processing and
DSP Implementation

数字信号处理与 DSP 实现技术

陈帅 主编

沈晓波 副主编



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

Digital Signal Processing and
DSP Implementation

数字信号处理与 DSP 实现技术

陈帅 主编

沈晓波 副主编

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理与DSP实现技术 / 陈帅主编. — 北京 : 人民邮电出版社, 2015.9
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材
ISBN 978-7-115-39809-3

I. ①数… II. ①陈… III. ①数字信号处理—高等学校—教材 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第149314号

内 容 提 要

本书针对应用型本科高校电子信息类专业的改革需求,结合电子信息类专业对专业基础课程教学的基本要求编写而成,是关于数字信号处理理论基础与DSP实现技术的一本基础教材。本书内容取材于数字信号处理学科发展的重要成果以及DSP实现的部分技术,并结合了作者多年教学和科研实践经验。本书注重将理论和应用实践相结合,在阐述数字信号处理理论知识整体性的同时,融入了MATLAB实现方法,并增加了体现应用性的DSP处理器的原理及其数字信号处理实现技术等内容。全书分为3大部分共9章:第1~4章讲述了数字信号与系统的处理和快速处理;第5~7章讲述了数字滤波器的设计理论;第8~9章讲述了数字信号与系统的DSP实现技术。

本书结构紧凑,语言通俗,深入浅出,例题丰富,可读性强,便于自学。可作为本科院校、职业院校电子信息类专业的教材或参考书。

-
- ◆ 主 编 陈 帅
副 主 编 沈晓波
责任编辑 邹文波
执行编辑 税梦玲
责任印制 沈 蓉 彭志环
- ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市潮河印业有限公司印刷
- ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 16 2015年9月第1版
字数: 379千字 2015年9月河北第1次印刷
-

定价: 42.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

本书是高等学校省级质量工程项目（皖教高〔2013〕11号）省级规划教材（No. 2013ghjc256）建设成果。在编写过程中，作者参考了国内外出版的多本同类教材，在教材体系、内容安排和例题配置等方面吸取了它们的优点，并结合了作者多年教学和科研实践经验，使得本书具有以下特点。

（1）内容安排合理。根据电子信息类本科专业教学对该门学科内容的要求，本书在兼顾内容完整性和注重知识点的阐述的基础上，适当减少了理论的证明推导等具体过程。

（2）突出实践性。为加强实践性训练，做到在学习中的应用，本书各章融入了 MATLAB 的内容。读者可在掌握该书理论知识的同时，使用 MATLAB 进行实践，从而加深对内容的理解。

（3）强调应用性。数字信号处理的理论只有最终与应用结合才能体现应用价值，为更好培养应用型人才，本书添加了数字信号的 DSP 处理器实现的内容。

本书各章课时安排建议如下。

章序	章名	课时安排
第 1 章	绪论	2
第 2 章	离散时间信号与系统	6
第 3 章	序列的傅里叶变换与 Z 变换	6
第 4 章	离散傅里叶变换与快速傅里叶变换	6
第 5 章	数字滤波器的结构	6
第 6 章	无限长脉冲响应数字滤波器设计	8
第 7 章	有限长脉冲响应数字滤波器设计	8
第 8 章	TMS320C55x DSP 处理器	6
第 9 章	数字信号的 DSP 处理器实现	4
合 计	52 课时	

本书第 1 章、第 2 章、第 5 章、第 6 章、第 7 章由陈帅教授编写，第 3 章由王丽编写，第 4 章由李营编写，第 8 章由沈晓波编写，第 9 章由贾鹏编写。全书由陈帅教授统稿，陈帅和王丽校对。

由于作者的水平所限，书中可能存在不恰当和错误之处，恳请广大读者提出批评指正。作者联系方式：

QQ: 764066992

电子邮箱: chen232001@126.com

第 1 章 绪 论	1	2.3.3 FIR 系统和 IIR 系统的差分 方程	30
1.1 数字信号与处理	1	2.4 连续时间信号的数字处理	30
1.1.1 信号、系统	1	2.4.1 抽样定理与 A/D 转换	30
1.1.2 数字信号处理	4	2.4.2 抽样信号的恢复与 D/A 转换	33
1.1.3 数字信号处理的实现方法	5	2.5 MATLAB 在离散时间信号与系 统中的应用	35
1.2 数字信号处理的内容与特点	5	2.5.1 MATLAB 在离散时间信号 中的应用	35
1.2.1 数字信号处理的内容	5	2.5.2 MATLAB 在离散时间系统 中的应用	37
1.2.2 数字信号处理的特点	6	思考题	40
1.3 数字信号处理的应用	6	第 3 章 序列的傅里叶变换与 Z 变换	42
1.3.1 在通信中的应用	6	3.1 序列的傅里叶变换	42
1.3.2 在消费电子中的应用	7	3.1.1 序列的傅里叶变换定义	42
1.3.3 在工业中的应用	7	3.1.2 序列的傅里叶反变换	44
1.3.4 在其他方面的应用	7	3.1.3 序列的傅里叶变换基本性质	44
思考题	7	3.2 周期序列的离散傅里叶级数与 傅里叶变换	48
第 2 章 离散时间信号与系统	8	3.2.1 周期序列的离散傅里叶级 数 DFS	48
2.1 离散时间信号-序列	8	3.2.2 周期序列的傅里叶变换表 达式	49
2.1.1 序列	8	3.3 Z 变换	50
2.1.2 序列的时域表示	8	3.3.1 Z 变换及其收敛域	50
2.1.3 序列的运算	10	3.3.2 逆 Z 变换	52
2.1.4 常用序列	19	3.3.3 Z 变换的基本性质	55
2.1.5 序列的周期性	22	3.4 离散系统的变换域分析	56
2.1.6 用单位取样序列表示任意 序列	23	3.4.1 传输函数与系统函数	56
2.1.7 序列的能量与功率	24		
2.2 离散时间系统	24		
2.2.1 线性时不变系统	25		
2.2.2 系统的稳定性和因果性	27		
2.3 线性常系数差分方程	28		
2.3.1 线性时不变系统的差分描述	28		
2.3.2 差分方程的求解	28		

3.4.2 系统的因果性和稳定性变 换域分析	56	5.2.3 级联型	94
3.4.3 系统的零极点分布与系统 函数特性	57	5.2.4 并联型	95
3.5 Z 变换的 MATLAB 实现	59	5.2.5 转置定理	96
3.5.1 MATLAB 的 Z 变换函数	59	5.3 有限长单位脉冲响应滤波器的 基本结构	97
3.5.2 MATLAB 的 Z 反变换函数	60	5.3.1 直接型	97
思考题	62	5.3.2 级联型	98
第 4 章 离散傅里叶变换与快速傅里叶 变换	64	5.3.3 频率抽样型	98
4.1 离散傅里叶变换	64	5.3.4 快速卷积型	103
4.1.1 离散傅里叶变换的定义 ..	64	5.3.5 线性相位 FIR 滤波器的 结构	104
4.1.2 离散傅里叶变换的性质与 定理	65	5.4 MATLAB 在数字滤波器结构 转换中的运用	105
4.2 快速傅里叶变换	70	5.4.1 滤波器系统函数的形式 ..	105
4.2.1 直接计算 DFT 的特点及改 进途径	70	5.4.2 滤波器的结构转换	106
4.2.2 按时间抽取的基 2 FFT 算法	71	思考题	109
4.2.3 按频率抽取的基 2 FFT 算法	79	第 6 章 无限长脉冲响应数字滤波器 设计	111
4.2.4 IDFT 的快速算法	82	6.1 数字滤波器设计任务与 IIR 数 字滤波器设计方法	111
4.2.5 FFT 的应用	82	6.1.1 数字滤波器的分类和特点	111
4.3 FFT 的 MATLAB 实现	85	6.1.2 数字滤波器设计的任务 ..	111
4.3.1 MATLAB 的 FFT 及 IFFT 函数	85	6.1.3 IIR 数字滤波器设计方法	114
4.3.2 用 MATLAB 实现 FFT 的 例题	86	6.2 模拟滤波器设计	115
思考题	87	6.2.1 由幅度平方函数设计模拟 滤波器系统函数方法	115
第 5 章 数字滤波器的结构	89	6.2.2 由模拟滤波器原型设计模 拟滤波器系统函数	118
5.1 数字滤波器结构的表示方法 ..	89	6.2.3 模拟滤波器阶次和 3dB 截 止频率的计算	125
5.1.1 框图法	89	6.3 脉冲响应不变法	127
5.1.2 信号流图法	91	6.3.1 脉冲响应不变法的原理和 方法	127
5.2 无限长单位脉冲响应滤波器 的基本结构	92	6.3.2 脉冲响应不变法的频率响应	128
5.2.1 直接 I 型	92	6.3.3 脉冲响应不变法的设计修正	128
5.2.2 直接 II 型	93		

6.4 双线性变换法	129	7.3.2 频率抽样法的线性相位设计	174
6.4.1 双线性变换法原理	129	7.3.3 过渡带设计	177
6.4.2 双线性变换的频率对应关系	131	7.4 MATLAB 在 FIR 滤波器设计中 的应用	179
6.4.3 常数 k 的选择	131	7.4.1 基于窗函数的 FIR 滤波器 设计函数——fir1	179
6.4.4 双线性变换法设计滤波器的 步骤	132	7.4.2 基于频率抽样法的 FIR 滤 波器设计函数——fir2	181
6.5 直接在数字域设计 IIR 滤波器	133	7.4.3 等纹波最佳逼近设计 FIR 数 字滤波器设计函数——firpm	182
6.5.1 阶次 N 已知的直接 IIR 数 字滤波器设计	133	7.4.4 最小二乘法线性相位 FIR 数字滤波器设计函数——firls	183
6.5.2 阶次 N 未知的直接 IIR 数 字滤波器设计	137	7.4.5 用 MATLAB 实现序列的滤 波——filter	184
6.6 滤波器的频率变换	139	思考题	185
6.6.1 模拟域的频带变换法	140	第 8 章 TMS320C55x DSP 处理器	187
6.6.2 数字域频率变换	144	8.1 概述	187
思考题	146	8.2 TMS320C55x 的硬件结构	188
第 7 章 有限长脉冲响应数字滤波器 设计	147	8.2.1 TMS320C55x 的结构	188
7.1 线性相位 FIR 滤波器	147	8.2.2 引脚	190
7.1.1 线性相位 FIR 滤波器条件	147	8.2.3 CPU	194
7.1.2 线性相位 FIR 滤波器的幅 频特性	150	8.2.4 CPU 寄存器	197
7.1.3 线性相位 FIR 滤波器的零 点特性	155	8.2.5 存储空间和 I/O 空间	201
7.2 FIR 滤波器的窗函数设计方法	155	8.2.6 堆栈操作	202
7.2.1 窗函数设计的基本方法	155	8.2.7 中断和复位	203
7.2.2 窗函数序列及其特性	159	8.2.8 时钟发生器	204
7.2.3 理想滤波器及其单位脉冲 响应	167	8.2.9 定时器	206
7.2.4 MATLAB 中的窗函数	169	8.2.10 GPIO	207
7.3 FIR 滤波器的频率抽样法设计	174	8.2.11 外部存储器接口	207
7.3.1 频率抽样法设计思想	174	8.2.12 多通道缓冲串口	208
		8.2.13 模数转换	209
		8.2.14 I ² C 模块	210
		8.2.15 看门狗定时器	210
		8.3 集成开发环境与指令系统	212
		8.3.1 CCS 的使用	214

8.3.2 寻址方式	214	9.2 TMS320C55X 的信号处理实现	233
8.3.3 指令系统	215	9.2.1 快速傅里叶变换的 DSP 处理器实现	233
8.4 汇编程序设计	217	9.2.2 IIR 滤波器的 DSP 处理器实现	239
8.4.1 浮点加减运算	217	9.2.3 FIR 滤波器的 DSP 实现	243
8.4.2 浮点乘除运算	219	9.3 基于 TMS320C55X 的数字语音信号处理实现实例	245
8.4.3 内建函数的使用	224	9.3.1 语音信号编解码原理	245
思考题	224	9.3.2 语音信号编解码的 DSP 处理器实现	246
第 9 章 数字信号的 DSP 处理器实现	226	思考题	247
9.1 C/C++ 语言编程基础	226	参考文献	248
9.1.1 数据类型与关键字	226		
9.1.2 寄存器变量	228		
9.1.3 asm 和 Pragma 指令	228		
9.1.4 存储器模式与分配	229		
9.1.5 中断处理	231		
9.1.6 系统初始化	231		

【本章学习目标】

1. 掌握数字信号和数字信号处理的基本概念；
2. 了解数字信号处理的实现方法；
3. 了解数字信号处理的特点；
4. 了解数字信号处理的应用。

【本章能力目标】

1. 在理解了数字信号和数字信号处理概念的基础上，了解数字信号处理的内容、特点，初步形成对数字信号处理学科的感性认识；
2. 通过介绍数字信号处理的实现和应用，培养学生学习该门课程的兴趣。

1.1 数字信号与处理

1.1.1 信号、系统

1. 信号

信号是传递信息的载体，是信息的物理表现形式。信号可以表现为多种形式，如电信号、磁信号、声信号、光信号、机械信号、热信号等。

信号在数学上可表示为一个或多个自变量的函数，或表示成一个或几个独立变量的函数，如 $f(x)$ 、 $f(t)$ 、 $x(t)$ 、 $f(x, y)$ 等，其中括号内变量为自变量。

信号可以从不同角度进行分类。

(1) 按照自变量的个数，信号可以分为一维信号、二维信号、多维信号。

信号的自变量可以是时间、频率、空间位置或其他物理量。若信号是一个变量的函数，则该信号为一维信号，例如，语音可以看成是时间的一维信号；如果信号是两个变量的函数，则称为二维信号，例如图像可以看成是平面空间坐标位置的二维信号；视频则可以看成是空间位置以及时间的多维信号（信号的自变量大于两个）等。本书只讨论一维信号。

(2) 按照信号是否具有重复性，可以分为周期信号和非周期信号。

若信号满足 $f(t) = f(t + kT)$ ， k 为整数；或 $x(n) = x(n + N)$ ， N 为满足等式的最小正整数， k 和 n 为任意整数，则信号 $f(t)$ 和 $x(n)$ 都是周期信号，其中 T 为信号 $f(t)$ 的周期， N 为信号 $x(n)$ 的周期。否则是非周期信号。

(3) 按照信号取值是否确定不变性，可以分为确定信号与随机信号。

若信号在任意时刻的取值是精确确定不变的，则称该信号为确定信号；若信号在任意时刻的取值是不能精确确定而是随机变化的，则该信号称为随机信号。

(4) 按照信号的能量有限性,可以分为能量信号和功率信号。

若信号能量有限,则称信号为能量信号;若信号功率有限,则称信号为功率信号。

(5) 按照信号自变量和幅度的连续或离散性,可以分为模拟信号、离散时间信号和数字信号。

在连续时间范围内有定义且幅值也连续的信号称为连续时间信号,连续时间信号也称为模拟信号。如果用数学函数来表示信号,则模拟信号是自变量和幅度都可以连续取值的信号。如果用函数 $x(t)$ 来表示一维模拟信号,其中 t 为自变量,则模拟信号 $x(t)$ 的自变量 t 可以在其定义域内连续取值,且函数 $x(t)$ 可以在其值域范围内连续取值,如图 1-1 所示。若 t 为时间,则 $x(t)$ 为连续时间函数,即模拟信号。

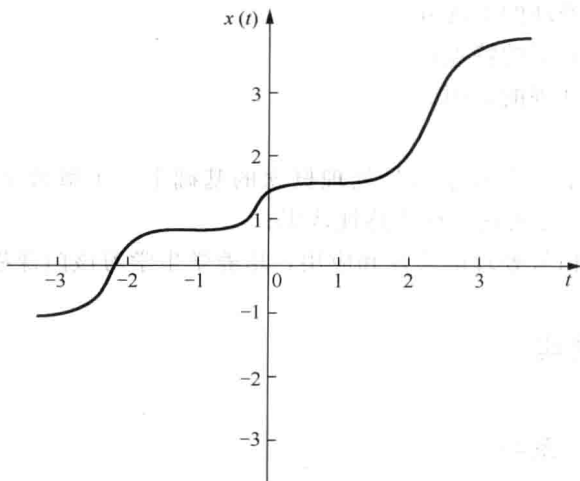


图 1-1 模拟信号

图 1-1 中的自变量 t 可以取整数 -1 、 -2 、 -3 、 $\dots$;也可以取整数 0 、 1 、 2 、 3 等;还可以取整数之间的任意小数,如取 1.1 、 1.2 、 1.12 、 1.123 等,也就是说 t 可以取其定义域内的任意值,即可以连续取值。同样,函数值 $x(t)$ 可以取 2 、 2.3 、 2.4 、 2.31 、 2.311 等值,这些值都是函数的值域范围内的值,即函数 $x(t)$ 可以连续取值域范围内的任意值而不仅仅限于取离散的整数值。

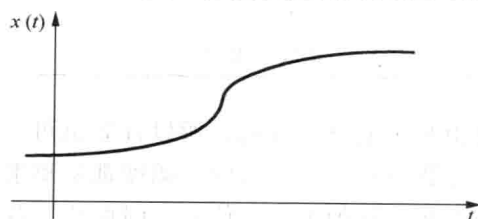
若模拟信号 $x(t)$ 的自变量 t 取有限分离点值,如对 t 进行等间隔取值,例如取 $t = \dots, -2\Delta T, -\Delta T, 0, \Delta T, 2\Delta T, 3\Delta T, \dots$ (其中 ΔT 为取样间隔),而舍去这些取值之间 t 的取值,称为将时间变量离散化。若取值间隔相同,则称为均匀取样,否则称为非均匀取样。由时间离散化的函数取值 $\dots, x(-2\Delta T), x(-\Delta T), x(0), x(\Delta T), x(2\Delta T), x(3\Delta T), \dots$ 组成一个新的信号,称为离散时间信号,可以表示为: $\dots, x(-2), x(-1), x(0), x(1), x(2), x(3), \dots$ 。离散时间信号也称为序列。图 1-2 (a) 为模拟信号,图 1-2 (b) 为序列。序列的自变量是取离散整数(表示离散取样序号)。

通过将模拟信号的时间离散而得到的信号其幅度还是可以取连续的值。若将模拟信号的幅度离散,即幅度取离散的值,而时间取连续的值,则得到的信号(函数)称为量化信号。图 1-2 (c) 为量化信号,其中函数的时间 t 可以连续取值,而幅度 $x(t)$ 只能取间隔的值,在两个相邻间隔值之间的取值是无意义的。

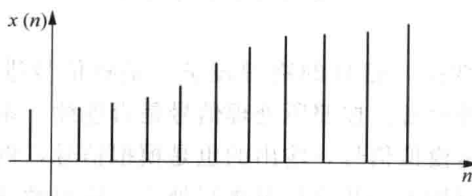
若时间和幅度都离散,即信号的时间取离散的值,幅度也取离散的值,则称为数字信

号。数字信号如图 1-2 (d) 和图 1-3 所示。数字信号的自变量是离散取值，而函数也是离散的取值。

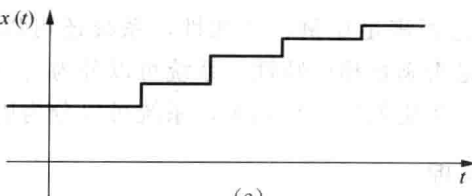
根据信号的自变量（时间）和幅度是否连续进行分类的四种信号对比见表 1-1。



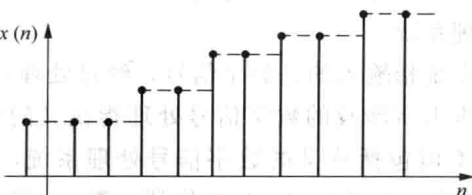
(a)



(b)



(c)



(d)

图 1-2 四种信号对比

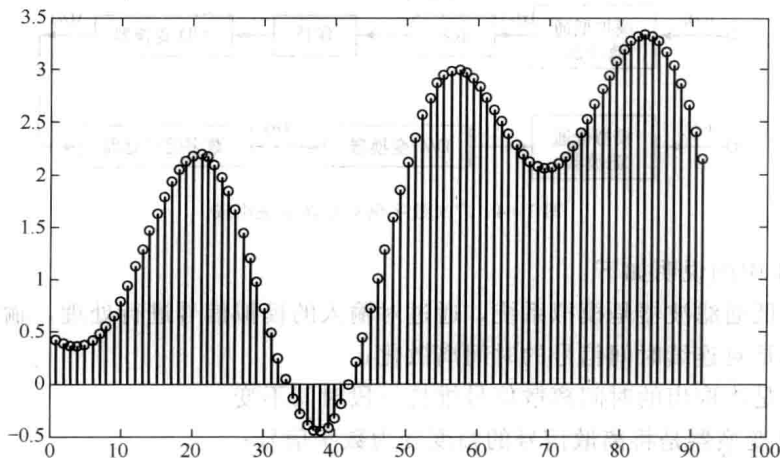


图 1-3 数字信号

表 1-1 根据信号自变量（时间）和幅度是否连续的信号分类

时 间 \ 幅 度	连 续	离 散
连 续	模拟信号	量化信号
离 散	离散时间信号	数字信号

因为计算机的 CPU 是由数字电路组成的，所以计算机可以非常方便地对数字信号进行处理运算。图 1-3 所示为数字信号，其时间、幅度都是离散的。由于模拟信号幅度可以通过模拟/数字转换器（ADC）转换为数字信号，因而研究数字信号时主要考虑时间离散的离散时间信号和数字信号。离散时间信号常称为序列。

2. 系统

系统定义为处理（或变换）信号的物理设备，是将信号进行加工、变换、运算等处理，以达到人们要求的各种设备。按照所处理信号是否连续，系统可以分为模拟系统和数字系统。模拟系统输入的是模拟信号，输出的也是模拟信号，例如晶体管放大电路就是一个模拟系统。数字系统是对输入的数字信号进行处理，输出数字信号的系统，例如，计算机数字图像处理。

根据处理前后的信号是否满足比例、叠加性，系统还可以分为线性系统、非线性系统。根据处理前后的信号是否满足移位特性，系统可以分为时（移）不变、时（移）变系统。根据处理后信号是否与历史处理信号相关，系统可以分为因果系统和非因果系统。

1.1.2 数字信号处理

数字信号的处理是由数字信号处理系统完成的。凡是对数字信号进行处理的物理装置都可以看成是数字信号处理系统。

狭义的数字信号处理系统指输入的是数字信号，经过处理后输出的也是数字信号的系统。例如，数字滤波器。本书所涉及的数字信号处理指狭义的数字信号处理系统的处理。广义的数字信号处理系统不但包括狭义的数字信号处理系统，还可能包含模拟低通滤波器、A/D 变换器（模拟/数字变换器）、D/A 变换器（数字/模拟变换器）等。图 1-4 所示为广义的数字信号处理系统的组成框图。

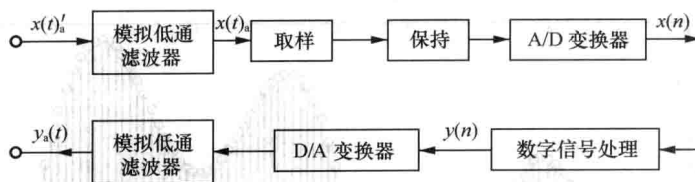


图 1-4 广义数字信号处理系统组成

对图 1-4 中的说明如下：

- （1）模拟低通滤波器是模拟系统，通过对输入的模拟信号进行处理，输出模拟信号；
- （2）取样是对连续时间信号的时间离散化；
- （3）保持是将取出的时间离散信号维持一段时间不变；
- （4）A/D 变换器是将离散信号的幅度变为数字信号；
- （5）D/A 变换器是将数字信号变为时间连续的阶梯信号的系统，阶梯信号再通过低通

模拟滤波器就得到幅度平滑的模拟信号。

图 1-5 所示的是经过数字信号处理系统而发生变化的一个信号波形的例子。其中图 1-5 (a) 为输入的模拟信号；图 1-5 (b) 为经过输入的模拟低通滤波器后得到的模拟信号；图 1-5 (c) 为 A/D 变换后的数字信号；图 1-5 (d) 为数字信号处理后得到的数字信号；图 1-5 (e) 为通过 D/A 变换和模拟低通滤波器后得到的模拟信号。

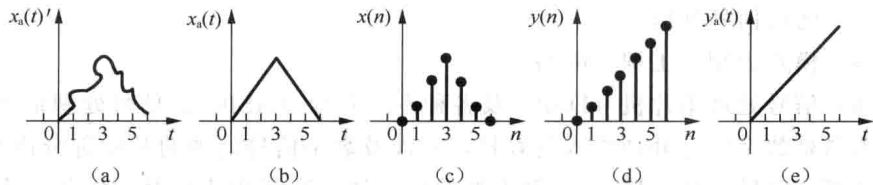


图 1-5 经过广义数字信号处理系统的信号

1.1.3 数字信号处理的实现方法

数字信号处理是通过数字信号处理系统来实现的，实现方法有以下几种。

1. 通用软件方法实现系统

在计算机上使用通用软件实现数字信号处理。例如，使用 MATLAB 软件进行数字信号处理，采用 Photoshop 进行数字图像处理等。这种方法处理速度慢，一般用于处理算法模拟。

2. 专用加速处理机方法

借助于软件开发工具和开发语言，例如 C、Java 设计数字信号处理软件。例如开发设计一个可执行软件，用于计算机断层扫描的处理。这类系统专用性较强。

3. 软硬件结合的嵌入式处理方法

(1) 采用数字信号处理器结合嵌入式软件进行数字信号的处理。例如，采用 TMS320C55XX 进行数字语音信号处理的系统，采用 TMS320DM642 处理数字图像、数字视频的系统。这类方法应用广泛。

(2) 采用单片机的方法。这类方法只能进行一些不太复杂的数字信号处理算法，例如数字控制。

4. 硬件方法

采用数字集成电路实现数字信号的处理。例如，用数字集成电路 (Integrated Circuit - IC) 实现语音编解码，用现场可编程器件 (FPGA) 实现数字调制、数字视频压缩等。此类方法专用性较强。

1.2 数字信号处理的内容与特点

1.2.1 数字信号处理的内容

数字信号处理涉及的内容非常广泛，数字信号处理主要包括如下内容。

(1) 离散线性时不变系统理论。包括时域、频域、各种变换域。

(2) 频谱分析。快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 谱分析方法及统计分析方法，也包括有限字长效应谱分析。

- (3) 数字滤波器设计及滤波过程的实现（包括有限字长效应）。
- (4) 时频-信号分析（短时傅氏变换，Short Fourier Transform），小波变换（Wavelet Analysis），Wigner Distribution。
- (5) 多维信号处理（压缩与编码及其在多媒体中的应用）。
- (6) 非线性信号处理。
- (7) 随机信号处理。
- (8) 模式识别人工神经网络。
- (9) 信号处理单片机（DSP）及各种专用芯片（ASIC），信号处理系统实现。

本书是数字信号处理的入门教材，只涉及数字信号处理的基础部分内容：离散线性信号与系统（时域、变换域）、离散变换快速算法、数字滤波技术、数字信号处理的实现等。

1.2.2 数字信号处理的特点

数字信号处理具有以下特点。

(1) 数字信号精度高。模拟电路中元器件精度达到 10^{-3} 以上都不容易，而数字系统只要 17 位字长精度就可以达到 10^{-5} 。基于离散傅里叶变换（Discrete Fourier Transform, DFT）的数字频谱分析仪的幅度精度和频率分辨率远高于模拟频谱仪。

(2) 数字信号处理灵活性强。数字信号处理采用数字系统，其性能取决于数字运算的系数。数字系统的系数调整比模拟系统调整参数方便。

(3) 数字信号处理可以实现模拟信号难以实现的特性。例如，可以设计线性相位滤波器，可以通过存储实现延时，通过压缩减少数据量。

(4) 数字信号处理可以实现多维信号处理。不但可以处理语音等信号，还可以处理图像、视频等高维信号。

当然，数字信号处理也存在缺点：需要模拟接口等增加了系统复杂性；由于取样定理的约束，其应用的频率受到限制；功耗大。

1.3 数字信号处理的应用

数字信号处理的应用十分广泛，其应用领域包括通信、计算机网络、雷达、自动控制、地球物理、声学、天文、生物医学、消费电子产品等各个领域，已经成为了信息产业的核心技术之一。正因为数字信号处理具有广阔的应用范围，这些应用离不开数字信号处理理论的基础。数字信号处理的理论与技术本身也成为了信号与信息处理学科中一个重要且十分活跃的分支。

1.3.1 在通信中的应用

从第二代通信开始就是基于数字技术的数字通信。通信中采用数字信号进行信源编码、信道编码、多路复用、数据压缩。数字语音便于压缩处理，便于控制和计费，抗干扰能力强，在现代通信中普遍使用。

基于数字数据通信的互联网应用非常广泛。在因特网中传输的是数字信号，信号在传输交换中可以经过压缩、编码等数字处理，也可以以数字方式进行存储。

在移动通信、数字无线电、非对称数字用户线路 (Asymmetric Digital Subscriber Line, ADSL)、IP 电话、软件无线电、卫星通信等方向都有大量应用。

1.3.2 在消费电子中的应用

数字信号处理在数字语音、汽车多媒体、MP3/MP4/MP5、数字扫描仪、数字电视机顶盒、医院监视系统、生物指纹系统等领域都有大量应用。

数码相机、数字电视、数字计算机都是数字信号的处理系统。数码相机将外界的模拟图像变换成数字图像, 根据一定的数字压缩算法处理, 获得占用存储空间较小的数字文档。数字电视则是将模拟视频转换为数字视频后进行数字压缩编码, 再经过数字广播发送出去, 接收方获得数字电视信号后再进行逆变换。计算机中的文档、表格、图片、歌曲、视频等多媒体都是经过数字处理的结果。这些文档、表格等媒体是在专用的处理软件或编码方法下进行, 可以存储、传输、编辑、转化等并可以通过输出设备进行输出。

另外, 数字语音中的语音分析、合成、识别、增强、编码, 数字图像中图像的增强、恢复、去噪、压缩, 都需要用到数字信号处理。

1.3.3 在工业中的应用

工业中的数控机床、数控加工中心、3D 打印、数码排版印刷、数字雕刻机、机器视觉、频谱分析仪、函数发生器、地震信号分析、二维码扫描、物联网通信、RFID 等都与数字信号处理密切相关。

1.3.4 在其他方面的应用

雷达中采用数字技术对目标进行探测、定位、成像。声呐处理、导航、卫星侦察等也都将用到数字信号处理技术。

思考题

1. 什么是数字信号?
2. 什么是数字信号的处理?
3. 数字信号处理系统的实现方法有哪些?
4. 数字信号处理有哪些应用?
5. 数字信号处理包含哪些内容?
6. 数字信号处理的特点是什么?

第2章

离散时间信号与系统

【本章学习目标】

1. 掌握序列和单位取样响应的概念；
2. 掌握常用序列和序列的常用运算，理解序列的周期性；
3. 掌握离散时间系统的线性时不变性；
4. 掌握离散时间系统的稳定性和因果性；
5. 了解差分方程的求解方法；
6. 了解连续时间系统的数字化处理过程和恢复。

【本章能力目标】

1. 学会求解序列的卷积和，能够判断和求解周期序列周期，能够判定离散时间系统的线性性、时不变性、稳定性、因果性；
2. 能够运用 MATLAB 产生序列、求解系统的单位取样响应、求解卷积和、求解差分方程。

2.1 离散时间信号-序列

2.1.1 序列

离散时间信号又称作序列 (Sequence)。在物理上是指定义在离散时间上的信号取样值的集合，在数学上可用时间序列 $\{x(n)\}$ 来表示。 $x(n)$ 代表序列的第 n 个样点的取值， n 代表时间的序号且为整数 ($-\infty < n < \infty$)，非整数点无定义或无意义。

对于抽样信号可以表示为 $\{x_a(nT)\}$ ， T 为抽样间隔时间。一般来讲，抽样时间间隔 T 固定，则抽样值表现为时间间隔序号的序列。所以也通常将 T 去掉，而用 $\{x(n)\}$ 来表示。

2.1.2 序列的时域表示

1. 枚举表示

枚举表示指把序列的全部取值一一列出在序列的集合中，并标注时间零点位置。如

$$\{x(n)\} = \{\cdots, -1.2, -6.7, 3.45, 0.7, 8, 5.3, \cdots\}$$

↑

其中箭头处表示对应 $n=0$ 时刻的抽样值，即 $x(0)=3.45$ ，则 $x(-1)=-6.7$ ， $x(-2)=-1.2$ ， $\cdots$ ； $x(1)=0.7$ ， $x(2)=8$ ， $x(3)=5.3$ ， $\cdots$

2. 公式表示

公式表示是指把序列的第 n 个取值 $x(n)$ 用通用的函数公式表示。例如

$$x(n) = \sin n\omega, \quad -\infty < n < \infty \quad (2.1)$$

$$x(n) = \begin{cases} a^{-n}, & n \geq 0, |a| \geq 1 \\ b^n, & 0 < n < 0, |b| \geq 1 \end{cases} \quad (2.2)$$

其中 n 取整数。 $x(n)$ 的全部用集合 $\{x(n)\}$ 或用 $x(n)$ 表示。

3. 图形表示

图形表示是指把序列的取值与离散时间变量 n 之间的关系用图形表示出来。例如序列 $x(n) = \begin{cases} -0.5, 0.75, 2, -1.5, 1, 2, 0.5, & n = -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$ ，用图形表示则如图 2-1 所示。

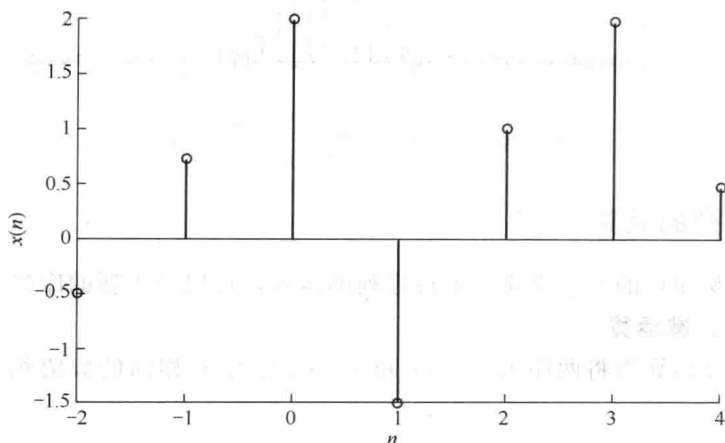


图 2-1 序列的图形表示

对于式 (2.1) 表示的序列，当 $\omega = 8\pi$ 时，则对应为 $x(n) = \sin 8\pi n$ ， $0 \leq n \leq 100$ ，图形表示如图 2-2 所示。

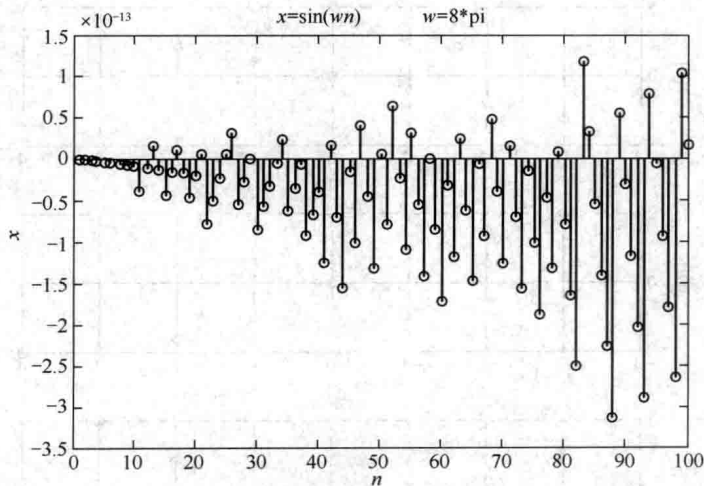


图 2-2 序列 $x(n) = \sin 8\pi n$ ， $-\infty < n < \infty$ 的图形

对于式 (2.2) 表示的序列，当 $a = 2$ ， $b = 3$ 时，则对应为 $x(n) = \begin{cases} 2^{-n}, & n \geq 0 \\ 3^n, & n < 0 \end{cases}$ ，图形表示如图 2-3 所示。