



电子信息与电气学科规划教材 · 电子电气基础课程

# 数字信号处理

(第2版)

刘益成 孙祥娥 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

内容简介



电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础教材

# 数字信号处理

## (第2版)

刘益成 孙祥娥 编著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书介绍数字信号处理的基本理论与分析方法。绪论介绍数字信号处理所涉及的一些基本内容;第1~2章作为数字信号处理的基础,介绍离散时间信号与系统的时域分析方法, $Z$ 变换和频域分析方法等内容;第3章介绍离散傅里叶变换和它的快速算法及其应用;第4~6章分别介绍数字滤波器的结构、IIR与FIR滤波器的设计方法;第7章论述数字信号处理中的有限字长效应;第8章讨论数字信号处理的软件实现方法,介绍MATLAB软件包及其信号处理工具箱的使用方法。为了加深对基本概念的理解和提高解题能力,各章都配有许多典型的例题,同时每章后面都附有习题。全书共4个附录,以便读者查阅、使用。

本书可作为高等院校工科电气与电子信息类、仪器仪表类专业本、专科的教材或教学参考书,也可作为有关科技人员的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/刘益成,孙祥娥编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2009.1

电子信息与电气学科规划教材·电子电气基础教材

ISBN 978-7-121-07707-4

I. 数… II. ①刘…②孙… III. 数字信号—信号处理—高等学校—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 174076 号

责任编辑:凌毅

印 刷:北京冶金大业印刷有限公司

装 订:三河市鹏成印业有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:20.5 字数:525 千字

印 次:2009 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4000 册 定价:29.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

## 再版前言

本书是《数字信号处理》(2004年,电子工业出版社)的第2版,除了改正原书中的一些错误外,还在原书的基础上作了如下修订。

(1) 在本书的开始,增加绪论部分,用来介绍数字信号处理的一些总体概念。

(2) 为了适应多抽样率信号处理应用日益广泛的需要,删去第1,2章中有关序列抽取与插值的内容。另外,在第2章中专门增加2.4节讨论序列抽取与插值及其频谱分析的内容。

(3) 为了加深学生对基本概念的理解和提高解题能力,特别是对序列的傅里叶变换、DFT等重要概念的理解,在第1~3章中增加了许多典型的例题。

(4) 鉴于在实际的应用中,大都是实序列,在第3章专门加入一小节,讨论实序列的快速算法。

(5) 删去第5章中5.7.2节最小平方逆滤波的内容。

(6) 在第8章中,增加8.7.3节介绍MATLAB中有关数字滤波器的设计工具,增加8.8节讨论信号处理和MATLAB在数字音频均衡器方面的应用,并对附录D信号处理工具箱函数进行了更新。第8章的内容既可结合前面相应章节的内容作为练习一起学习,也可以安排作为实验课的内容。

本书作为“数字信号处理”课程的教材在长江大学(原江汉石油学院)使用多年,该课程于2007年被评为湖北省精品课程。本书提供免费的电子课件、习题参考答案、学习指导等教学资源,可以从长江大学省级精品课程网站(<http://jwc.yangtzeu.edu.cn:8080/jpkc.aspx> 或 <http://dxxy.yangtzeu.edu.cn/bysj/main/>)上下载,也可登录电子工业出版社的华信资源教育网:[www.huaxin.edu.cn](http://www.huaxin.edu.cn) 或 [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn),注册后免费下载。

第1版中的第7章由孙祥娥编写,其余各章由刘益成编写,这次再版,第8章由杨顺辽负责修订,王浩南编写绪论中的表0-1和附录D,其他部分由刘益成修订。沈媛媛对习题参考答案进行了审定,课程组的其他老师对教材的修订提出了不少宝贵的意见,作者在此表示衷心的感谢。同时,作者对本书的责任编辑凌毅的帮助和辛勤工作深表谢意!

限于作者的水平,缺点和错误在所难免,恳请读者给予批评指正。

作者

2008年11月

E-mail: [ycliu@yangtzeu.edu.cn](mailto:ycliu@yangtzeu.edu.cn)

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 绪论                        | 1  |
| 第 1 章 离散时间信号与系统           | 8  |
| 1.1 离散时间信号                | 8  |
| 1.1.1 离散时间信号及其时域表示        | 8  |
| 1.1.2 序列的基本运算             | 9  |
| 1.1.3 一些常用序列              | 11 |
| 1.1.4 序列的周期性              | 12 |
| 1.1.5 用单位脉冲序列表示任意序列       | 13 |
| 1.1.6 序列的能量与功率            | 13 |
| 1.2 离散时间系统                | 14 |
| 1.2.1 线性时不变系统             | 14 |
| 1.2.2 线性时不变系统的基本元件        | 15 |
| 1.2.3 单位脉冲响应与线性时不变系统的卷积表示 | 16 |
| 1.2.4 序列的线性相关             | 18 |
| 1.2.5 系统的因果性与稳定性          | 19 |
| 1.3 线性时不变系统的差分方程描述        | 20 |
| 1.3.1 差分方程描述              | 20 |
| 1.3.2 差分方程的求解             | 20 |
| 1.4 连续时间信号的数字处理           | 21 |
| 1.4.1 抽样定理与 A/D 转换器       | 22 |
| 1.4.2 抽样信号的恢复与 D/A 转换器    | 25 |
| 1.4.3 带通信号的抽样             | 28 |
| 习题 1                      | 29 |
| 第 2 章 离散时间信号与系统的变换域分析     | 33 |
| 2.1 序列的 Z 变换              | 33 |
| 2.1.1 Z 变换的定义             | 33 |
| 2.1.2 Z 变换的收敛域            | 34 |
| 2.1.3 逆 Z 变换              | 36 |
| 2.1.4 Z 变换的性质与定理          | 41 |
| 2.1.5 Z 变换与拉氏变换的关系        | 46 |
| 2.2 序列的傅里叶变换              | 48 |
| 2.2.1 序列傅里叶变换的定义          | 48 |
| 2.2.2 序列傅里叶变换的性质          | 51 |
| 2.2.3 序列傅里叶变换的对称性         | 53 |
| 2.2.4 序列傅里叶变换举例           | 56 |

|       |                                        |     |
|-------|----------------------------------------|-----|
| 2.3   | 离散时间系统变换域分析                            | 58  |
| 2.3.1 | 系统函数                                   | 58  |
| 2.3.2 | 离散时间系统的 $Z$ 变换解法                       | 59  |
| 2.3.3 | 系统函数的零极点与频率响应                          | 61  |
| 2.3.4 | 系统的分类                                  | 63  |
| 2.3.5 | 全通系统与最小相位系统                            | 64  |
| 2.4   | 序列的抽取与插值及其频谱分析                         | 69  |
| 2.4.1 | 抽样率转换的基本概念                             | 69  |
| 2.4.2 | 序列的抽取及其频谱                              | 70  |
| 2.4.3 | 序列的插值及其频谱                              | 73  |
| 2.5   | 希尔伯特(Hilbert)变换                        | 75  |
| 2.5.1 | Hilbert 变换与解析信号                        | 75  |
| 2.5.2 | 实因果信号傅里叶变换的实部与虚部、对数幅度与相位的 Hilbert 变换关系 | 79  |
|       | 习题 2                                   | 81  |
| 第 3 章 | 离散傅里叶变换及其快速算法                          | 86  |
| 3.1   | 周期序列的离散傅里叶级数                           | 86  |
| 3.1.1 | 周期序列的傅里叶级数(DFS)                        | 86  |
| 3.1.2 | 离散傅里叶级数(DFS)的性质                        | 87  |
| 3.1.3 | 周期序列的傅里叶变换                             | 89  |
| 3.2   | 离散傅里叶变换                                | 90  |
| 3.2.1 | 有限长序列的离散傅里叶变换                          | 90  |
| 3.2.2 | DFT 的一些性质                              | 93  |
| 3.2.3 | 离散频率与数字频率和模拟频率之间的关系                    | 98  |
| 3.3   | 频域采样定理                                 | 99  |
| 3.4   | DFT 的快速算法——FFT                         | 102 |
| 3.4.1 | 时域抽取基-2 FFT 算法(DIT-FFT)                | 102 |
| 3.4.2 | 频域抽取基-2 FFT 算法(DIF-FFT)                | 106 |
| 3.4.3 | 逆 DFT 的快速算法(IFFT)                      | 108 |
| 3.4.4 | $N$ 为合数的 FFT 算法                        | 109 |
| 3.4.5 | 实序列 DFT 的快速算法                          | 112 |
| 3.5   | DFT 与 FFT 的应用                          | 113 |
| 3.5.1 | 利用 FFT 进行频谱分析                          | 113 |
| 3.5.2 | 用 FFT 计算线性卷积                           | 116 |
| 3.5.3 | 用 FFT 计算线性相关                           | 120 |
| 3.5.4 | 线性调频 $Z$ 变换(Chirp- $Z$ 变换)算法           | 124 |
|       | 习题 3                                   | 127 |
| 第 4 章 | 数字滤波器的结构                               | 131 |
| 4.1   | 数字网络的信号流图表示                            | 131 |
| 4.2   | IIR 数字滤波器的结构                           | 132 |
| 4.3   | FIR 数字滤波器的结构                           | 136 |

|              |                       |            |
|--------------|-----------------------|------------|
| 4.4          | 数字滤波器的格型结构            | 140        |
| 4.4.1        | 全零点型格型滤波器结构           | 141        |
| 4.4.2        | 全极点型格型滤波器结构           | 143        |
|              | 习题 4                  | 145        |
| <b>第 5 章</b> | <b>IIR 数字滤波器的设计</b>   | <b>148</b> |
| 5.1          | 引言                    | 148        |
| 5.2          | 模拟滤波器设计               | 151        |
| 5.2.1        | 模拟滤波器设计的基本概念          | 151        |
| 5.2.2        | 巴特沃思低通滤波器             | 153        |
| 5.2.3        | 切比雪夫滤波器               | 156        |
| 5.3          | 设计 IIR 滤波器的脉冲响应不变法    | 162        |
| 5.4          | 设计 IIR 滤波器的双线性变换法     | 164        |
| 5.5          | 设计 IIR 数字滤波器的频率变换法    | 169        |
| 5.5.1        | 从 S 域到 Z 域的频率变换法      | 170        |
| 5.5.2        | 数字域频率变换法              | 175        |
| 5.6          | 数字陷波器设计               | 178        |
| 5.7          | IIR 数字滤波器的计算机辅助设计     | 182        |
|              | 习题 5                  | 184        |
| <b>第 6 章</b> | <b>FIR 数字滤波器的设计</b>   | <b>187</b> |
| 6.1          | FIR 数字滤波器的性质          | 187        |
| 6.2          | FIR 滤波器的窗函数设计方法       | 192        |
| 6.2.1        | 窗函数设计的基本方法            | 192        |
| 6.2.2        | 常用的窗函数                | 196        |
| 6.2.3        | 几种常用的理想滤波器            | 199        |
| 6.2.4        | 窗函数法小结与举例             | 201        |
| 6.3          | FIR 滤波器频率采样法设计        | 205        |
| 6.4          | FIR 数字滤波器的等波纹优化设计     | 210        |
|              | 习题 6                  | 215        |
| <b>第 7 章</b> | <b>数字信号处理中的有限字长效应</b> | <b>218</b> |
| 7.1          | 二进制数的表示与量化误差          | 218        |
| 7.1.1        | 二进制数的表示               | 218        |
| 7.1.2        | 量化误差                  | 222        |
| 7.2          | A/D 转换器中的量化误差         | 226        |
| 7.2.1        | 量化误差的统计分析             | 226        |
| 7.2.2        | 量化信噪比与所需字长的关系         | 228        |
| 7.2.3        | 量化噪声通过线性非时变系统         | 228        |
| 7.3          | 系数量化对数字滤波器的影响         | 229        |
| 7.3.1        | 极点位置灵敏度               | 230        |
| 7.3.2        | 系数量化对二阶子系统极点位置的影响     | 232        |
| 7.3.3        | 频率响应偏差的统计分析           | 234        |

|              |                                   |            |
|--------------|-----------------------------------|------------|
| 7.4          | 数字滤波器的运算量化效应                      | 237        |
| 7.4.1        | IIR 滤波器定点运算舍入误差的统计分析              | 238        |
| 7.4.2        | IIR 滤波器定点加法运算的溢出问题                | 241        |
| 7.4.3        | 极限环振荡                             | 242        |
| 7.4.4        | 定点运算的溢出振荡                         | 244        |
| 7.4.5        | 浮点运算中的有限字长效应                      | 245        |
| 7.5          | FFT 算法的有限字长效应                     | 245        |
| 7.5.1        | 蝶形运算的统计模型                         | 245        |
| 7.5.2        | 防止溢出和 FFT 输出的信噪比                  | 247        |
| 7.5.3        | 浮点 FFT 算法中的量化效应                   | 249        |
|              | 习题 7                              | 249        |
| <b>第 8 章</b> | <b>MATLAB 在信号处理中的应用</b>           | <b>252</b> |
| 8.1          | MATLAB 简介                         | 252        |
| 8.2          | MATLAB 中离散信号的表示与运算                | 253        |
| 8.2.1        | 用 MATLAB 函数产生离散信号                 | 253        |
| 8.2.2        | MATLAB 中信号的运算                     | 255        |
| 8.3          | 用 MATLAB 进行系统分析                   | 256        |
| 8.3.1        | 系统零极点分析                           | 256        |
| 8.3.2        | 计算频率响应                            | 259        |
| 8.4          | 用 MATLAB 进行信号的变换                  | 264        |
| 8.5          | 用 MATLAB 设计 IIR 数字滤波器             | 267        |
| 8.5.1        | 模拟滤波器的设计函数                        | 267        |
| 8.5.2        | 模拟滤波器到数字滤波器的映射——由模拟滤波器变换成等效的数字滤波器 | 272        |
| 8.5.3        | 直接设计 IIR 数字滤波器的函数                 | 273        |
| 8.5.4        | IIR 滤波器设计举例                       | 277        |
| 8.6          | 用 MATLAB 设计 FIR 数字滤波器             | 281        |
| 8.6.1        | 设计 FIR 滤波器的函数                     | 281        |
| 8.6.2        | 常用的窗函数                            | 287        |
| 8.7          | 用 MATLAB 实现数字滤波器结构与滤波过程           | 289        |
| 8.7.1        | 用 MATLAB 实现数字滤波器结构                | 289        |
| 8.7.2        | 用 MATLAB 实现滤波过程                   | 292        |
| 8.7.3        | 滤波器设计和分析工具(FDATool)               | 295        |
| 8.8          | 数字音频均衡器                           | 297        |
|              | 习题 8                              | 302        |
| <b>附录 A</b>  | <b>FFT C 语言程序</b>                 | <b>305</b> |
| <b>附录 B</b>  | <b>用窗函数法设计 FIR 数字滤波器的 C 语言程序</b>  | <b>307</b> |
| <b>附录 C</b>  | <b>MATLAB 常用函数</b>                | <b>309</b> |
| <b>附录 D</b>  | <b>MATLAB 信号处理工具箱函数表</b>          | <b>311</b> |
|              | <b>参考文献</b>                       | <b>318</b> |

# 绪 论

随着电子技术、计算机技术和信息科学的迅速发展,信号的数字处理方法已经成为信号与信息处理的主要手段,研究将信号数字化并进行数字处理的理论与技术——数字信号处理相应地发展成为具有独立科学体系的学科。“数字信号处理”课程也成为电子信息、通信、仪器仪表、地球物理及其他需要信号处理知识专业的一门学科基础课。在开始深入学习本课程之前,首先对数字信号处理所涉及的一些基本内容进行简要介绍。

## 1. 信号的分类及转换

信号作为信息的载体,对其分类可根据信号的物理特性和数学特性两个方面进行。

### (1) 物理分类

从物理特性出发,信号可分为电信号和非电信号,同时根据信号存在的时间,信号可分为连续时间信号和离散时间信号。连续时间信号是指信号在一定的时间间隔内不间断持续存在,并且信号的幅值可取任何连续的数值。自然界中,大多数随时间变化的信号,如光、电、声、力、热等,大都是以连续时间信号的形式存在的,对于这种在时间上和幅度上都是连续的信号,有时也称为模拟信号。离散时间信号则是指信号存在的时间是离散的,只在一些特定的时间存在。例如,按年度或月份发布的人口统计数据和各种经济运行数据、一些控制系统中的定时控制开关量等。对离散时间信号,又可按信号幅值的取值范围分为抽样信号和数字信号。抽样信号虽然在时间上是离散的,但其幅度取值是连续的,例如,通过对模拟信号定时抽样得到的信号就是典型的抽样信号,这也是抽样信号名字的由来。数字信号则在时间和幅度的取值上都是离散的。事实上,所有能在数字电路和计算机上处理的信号都是数字信号。图 0-1 给出了信号的物理分类及其之间的关系。

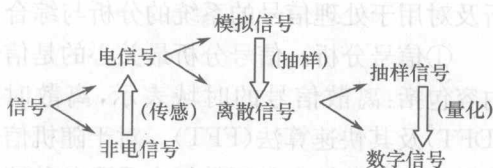


图 0-1 信号的物理分类

由于目前的数字电路与计算机大都只能处理数字电信号,因此,按图 0-1 所示非电信号进行处理之前,先要将非电信号通过传感器转换成电信号。如果信号是连续时间信号,要通过抽样变成离散信号或抽样信号,然后再对抽样信号进行量化而成为数字信号。有关抽样、量化和 A/D

转换的问题将在本书 1.4 节中详细讨论。需要指出的是,虽然本书讨论的是数字信号处理的原理和方法,但大部分讨论都是针对抽样信号进行的,仅在第 7 章中对由于信号的量化所产生的有限字长效应进行了论述。

### (2) 数学分类

为了便于分析,往往将信号用某种数学模型来描述,信号按其在数学上的统计特性可分为随机信号和确定信号。确定信号是指描述信号的函数可以用确定的解析公式给出,这样对于每一个确定的时刻,信号的值都是已知的。例如,常用的正弦信号,只要知道了信号的幅度、频率和初始相位,信号在任何时刻的值都是已知的。另一类信号是所谓的随机信号,对这类信号,信号在某个特定时刻的值是不能预先确切知道的,对它的数学描述只能采用概率统计的方

法。从信息获取的角度出发,只有随机信号才是有意义的,因为确定信号是预先就知道了的,不能给出任何新的信息,而且从信息论我们知道,信号的不确定度越大或随机性越强,所包含的信息量就越大。严格地讲,通信系统中传输的信号、科学研究中对自然界探测获得的各种有用信号,大都是随机信号。虽然如此,但本书只讨论确定信号的处理,因为这是研究随机信号的基础。

此外,从描述信号的自变量或坐标系来讲,信号又可分为一维信号、二维信号和三维信号,甚至多维信号。例如,语音和音乐信号就是典型的随时间变化的一维信号,图像信号是随空间二维坐标变化的二维信号,而视频信号则是随时间变化的图像,是典型的三维信号。也有人将随时间在空间传播的电磁波信号作为四维信号来处理。本书只讨论一维信号处理,而且其自变量通常假定为时间,也就是本书后面要讨论的离散时间信号,有关二维和三维信号的处理将在相应的图像处理和视频处理课程中研究。

## 2. 数字信号处理研究的内容与范围

简单地讲,数字信号处理就是利用计算机或专用的数字设备对信号进行采集、分析、合成、变换、估计、辨识等加工处理,以便提取有用的信息并进行有效的传输与应用。数字信号处理包括3个方面的内容。一是信号处理的理论与算法研究,目的是建立信号处理的数学模型,减少算法的复杂度,即研究如何以最小的运算量和最少的软硬件资源完成指定的任务。一个最著名的例子是20世纪60年代出现的离散傅里叶变换(DFT)的高效算法——快速傅里叶变换(FFT),它使得数字信号处理技术发生了革命性的变化。其二是数字信号处理的系统实现,除了系统有关的输入/输出部分外,其中最核心的部分就是算法的实现,即用硬件、软件或软硬件相结合的方法来实现各种算法。其三就是将数字信号处理的理论与系统实现应用于各种不同的领域,有关应用的问题将在后面专门介绍,下面先介绍理论与算法和系统实现所研究的内容。

### (1) 理论与算法研究

理论与算法研究的目标是建立信号处理的理论或数学模型,这包括对信号本身进行的分析及对用于处理信号的系统的分析与综合。

①信号分析。信号分析最关心的是信号的时域特性和频域特性,即信号的频谱。研究的内容包括:离散信号的时域表示,离散时间信号的傅里叶变换(DTFT),离散傅里叶变换(DFT)及其快速算法(FFT)。对于随机信号,为了能更准确地估计信号的频谱,往往还要针对信号的特点并结合应用的场合采取各种统计的估计方法。传统上联系时域分析与频域分析的纽带是傅里叶变换,但近年来,针对信号单独的时域分析与单独的频域分析在时间分辨率与频率分辨率方面的缺陷,提出了各种时-频联合分析方法,例如,短时傅里叶变换(Short Fourier Transform)、小波分析(Wavelet Analysis)、Wigner分布(Wigner Distribution)等。

②离散系统的分析与综合,对系统的研究最关心的是系统对信号的响应,在频域则表现为频率响应,相应的分析方法通常称为系统的输入/输出分析法。作为基础,对系统的研究首先是离散时间线性时不变系统的理论,包括系统时域分析、频域及各种变换域的分析方法。由于实际的系统并非是理想的线性时不变系统,随着计算技术的发展及实际的需要,各种时变和非线性系统处理方法也成为了数字信号处理学科研究的重要方面,例如,在模式识别中广泛应用的人工神经网络、对混沌系统理论的研究,都广泛应用了非线性分析方法。对多抽样率系统、自适应系统及用于对非平稳随机信号处理系统的研究,则需要采用时变系统分析方法。虽然

在大多数情况下,可将信号与系统分开来进行研究,但由于对系统的研究,特别是对线性时不变系统而言,可以用它的单位脉冲响应来代表,而单位脉冲响应本质上也是一种信号,因此,对信号与系统的分析实际上也是统一的。

③数字滤波器。实际上数字滤波器就是一种典型的离散系统,但由于其应用广泛,因此将它单独列出作为一个方向。数字滤波器包括两个方面的问题:数字滤波器的设计与滤波过程的实现。最初,数字滤波器类似于模拟滤波器,主要是从其频率响应特性出发来进行综合,对信号进行滤波的目的是将信号不同的频率成分分开,这类滤波器更确切地说应该是频率滤波器。在离散线性时不变系统中,两种最重要的频率数字滤波器是 IIR(无限脉冲响应)滤波器和 FIR(有限脉冲响应)滤波器,本书将重点讨论这两种滤波器的设计方法。随着随机信号处理技术的发展,滤波的概念有了更广泛的含义,广义的滤波包括从噪声中提取有用的信号,如维纳滤波、卡尔曼滤波、自适应滤波等,这些滤波器的设计采用了各种随机信号处理的方法,并在信号检测与估计中具有广泛应用,是信号处理领域研究的重要方向。

④多维数字信号处理。多维数字信号处理是当前数字信号处理中最活跃的研究领域之一,数字图像处理是典型的二维信号处理,而数字视频处理与三维医学成像系统是三维数字信号处理的典型代表。随着现代通信技术、互联网技术的飞速发展,移动通信与数字视频的广泛使用,对包括多维数字信号的编码、压缩、处理、传输及其在多媒体中的应用等的研究日益深入,并在推动信息产业的革命中发挥了重要作用。

⑤系统分析的另一种方法是状态空间法,与系统的输入/输出分析法相对应,这种分析方法更强调系统的动态特性,该分析方法在自动控制领域被广泛采用。

## (2) 系统的实现

系统的实现包括数字信号处理算法的硬件、软件或软硬结合的实现方法。

①数据采集。如前所述,由于自然界中许多信号都是连续时间信号,为了便于进行处理,首先需将连续时间信号转换成数字信号,这种转换的过程称为数据采集。采集过程包括对信号抽样、量化与编码,由于这 3 个过程实际上都是在 A/D 转换器上进行的,所以 A/D 转换器也成了数字信号处理的一个研究与应用领域,典型的例子是基于增量调制与多抽样率信号处理理论的过抽样 A/D 转换器。该类转换器由于性能好,成本低,在音频和低频频段的系统实现中获得了广泛应用。当然,在实际的采集过程中还包括对模拟信号的预处理。

②信号处理算法的软件实现,指在通用计算机上通过编写软件(如用 Fortran、C 语言或其他计算机语言)来实现数字信号处理的算法。软件实现的一个著名例子是 MATLAB 的信号处理工具箱,该工具箱收集了目前已经成熟的许多信号处理算法,可以方便地用于算法研究、系统仿真、教学等,本书将在第 8 章进行专门介绍。在通用计算机上用软件进行信号处理的另一类重要应用是对大规模数据的后处理,例如,对地震勘探数据的处理、卫星遥感资料的处理及气象预报资料的处理等,这些处理的数据量通常非常巨大,对它们的处理一般都是在数据采集完成后在巨型计算机上通过编写专用的处理软件完成的。随着现代计算机技术的发展,多核多处理器及多线程技术的出现,如何在这样的计算机上充分发挥它们的优势,有效地实现算法成了数字信号处理算法与计算机技术共同关心的问题。

③用数字信号处理器(DSP)实现。DSP 是一种针对数字信号处理算法而设计的微处理器,自 20 世纪 80 年代诞生以来,在二十几年内得到快速发展。与传统的计算机和处理器相比,DSP 具有以下特点:在计算机体系结构上,采用了修正的 Harvard 结构和多总线结构,支持流水线操作,具有多个 ALU 单元,并增加了专用的乘累加单元及丰富的在片资源,加上专

门为数字信号处理算法设计的指令系统,大大提高了指令执行速度和数据的吞吐能力,目前 16 位定点 DSP 上的乘法器的执行速度可达到 3ns,甚至更少。世界上最大 DSP 生产厂商——美国德州仪器(TI)公司预计到 2010 年将 DSP 执行速度提高到每秒 3 亿万条指令(3 000 000MIPS)。由于 DSP 所具有的可编程性和强大的处理能力,能完成复杂的数字信号处理的算法,使之特别适合于在需要具有现场实时数据处理能力的场合,其应用已经深入到科学研究和工业部门的许多领域,在嵌入式实时信号处理系统中占有重要地位。目前,嵌入式实时信号处理系统实现的发展趋势是采用嵌入式处理器如 ARM,PowerPC 等作为控制管理单元,DSP 作为核心处理器,FPGA(现场可编程逻辑器件)作为接口来共同实现,这种方式的数字信号处理系统实现通常都是软、硬件相结合的方式。

④除了通用的 DSP 外,目前还采用专用芯片(ASIC,Application Specific Integrated Circuit)来准硬件实现。这些 ASIC 专用芯片通常是针对某种专门用途进行设计的,具有极快的运算速度和极高的性价比。例如,专门的 FFT 和 FIR 滤波器芯片,为音乐、视频处理专门设计的 MP3、DVD 芯片,为电机控制专门设计的变频控制芯片等。

随着现代电子技术、计算机技术与数学的发展,新的计算方法和新的电子器件的不断出现,各个学科的交叉与融合,数字信号处理学科无论是在理论研究上还是在实际的系统实现上,也必将得到更进一步的发展。

### 3. 数字信号处理在信号处理系统中的位置

图 0-2 所示为一个模拟信号数字处理系统的典型框图,输入的模拟信号经传感、预放、滤波等预处理后送给 A/D 转换器转换成数字信号,再送入计算机或专用数字设备进行处理,最后再将处理后的数字信号经相反的转换器,即数模(D/A)转换器,转换成模拟信号输出。当然,在实际的系统中,并不一定包含这里给出的所有功能框图,有的系统中只需要数字输出,如输出用于控制的开关变量、数字的图形显示数据等;有时系统的输入本来就是数字信号,也就没有必要进行 A/D 转化了。在图 0-2 中,虚线框内的部分就是数字信号处理部分。

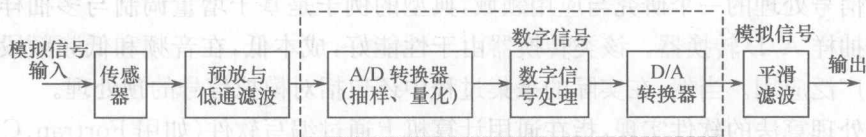


图 0-2 模拟信号数字处理系统的典型框图

为了更形象的说明,图 0-3 给出了人类对声音的感知过程及与之相应的数字信号处理系统框图。

图 0-3 中,将人的大脑当作模拟计算机或模拟信号处理器,人耳为声音传感器,通过大脑判断信号的存在与感觉。而与之对应的数字信号处理系统,则由麦克风将声音信号转换成电信号,在 A/D 转换器中进行抽样、量化、编码后,将连续时间电信号转换成数字信号,数字信号表现为按照特定的编码方式形成的 0、1 数字串。再将它们送到数字计算机或数字信号处理器中进行处理,输出经过处理后的 0、1 数字串,最后送给 D/A 转换器重新变回为模拟信号。当然,若要变成能听见的声音信号,还需将这个输出的模拟电信号通过喇叭转换为声音信号。

### 4. 数字信号处理的优点

与模拟信号处理系统相比,数字信号处理系统有以下优点。

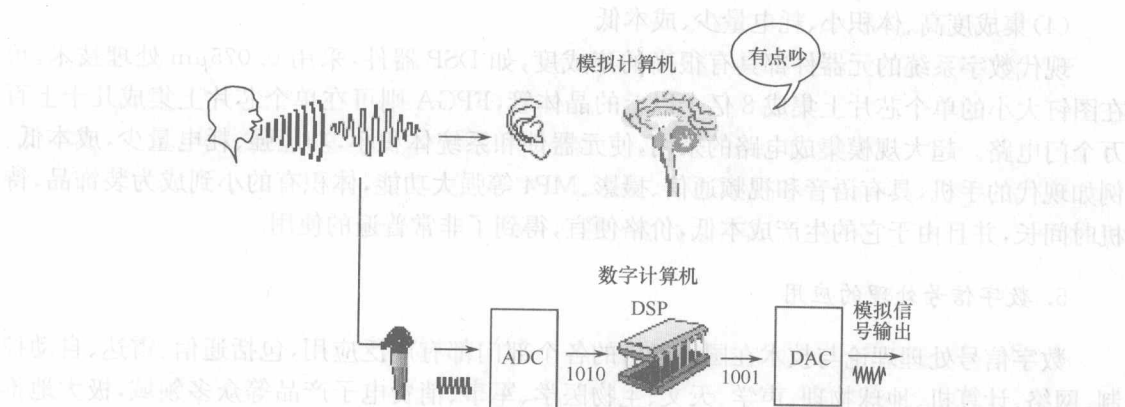


图 0-3 人类对声音的感知过程及与之相应的数字信号处理系统

### (1) 可编程特性

数字信号处理系统的一个显著优点是它的可编程特性,特别是对于采用微机、DSP 等可编程器件通过软硬件构成的系统。这种可编程特性使得系统具有很大的灵活性及可升级特性,如果需要系统执行某些新的功能或系统升级,只要编写相应的程序或对代码进行相应的修改,可使同一个硬件系统完成多种功能,而不必对系统的硬件大动干戈。一个著名的例子是近年来基于高速 A/D、DSP 与多抽样率技术发展起来的软件无线电,它可通过软件改变工作在多个频段,特别适应于在军事上需要迅速改变工作频率的环境。同时由于可编程特性,也大大地减少了系统的开发周期与成本。

### (2) 稳定性

稳定性对于任何系统都是至关重要的。模拟系统的稳定性取决于工作温度、湿度、元器件老化及模拟元器件的容差等因素。这些因素会导致同一个设计所生产出的不同产品或者同一产品因工作环境不同或使用年限不同而性能有差别。例如就滤波器而言,构成模拟滤波器的电阻、电容、电感和运放都要受到这些因素的影响,因此,随着时间和工作环境的变化,其性能就要发生变化,严重时甚至不能正常工作。同时,通常模拟元器件标称值的离散性大,容差都在 10% 的范围内,在 1% 范围内的器件价格要高出许多,由于器件标称值的离散性,使得同一个设计产品的性能不一致。数字系统则不存在这些问题,相对于模拟滤波器,构成数字滤波器的是滤波器的系数值,当它采用某一固定长度的二进制数表示后,是不会因温度、湿度、使用年限而改变的,而且同一个数字,只要字长确定后,在任何相同字长的系统中其数值都是相同的,不会有差别。正是由于这些原因,使得数字系统的重复性好,而且一般而言,数字系统的抗干扰能力也比模拟系统强,因而系统稳定性好。

### (3) 精度高、性能好

模拟系统的精度和性能取决于模拟元器件的精度,前面说过,在模拟系统中,元器件的精度要做到  $10^{-3}$  就相当困难,对数字系统而言,其精度和性能主要由系统的字长决定,目前数字系统普遍采用的 16 位字长表示数的精度为  $2 \times 10^{-5}$ ,而 32 位字长表示数的精度高达  $10^{-9}$ ,这是模拟系统不能相比的。同时在许多高性能的应用中,模拟系统由于实现方法的限制,根本无法达到,例如传统的模拟滤波器,要做到线性相位响应是十分困难的,而对于数字滤波器,则是很容易的事情。再如在数字视频系统中采用数据压缩技术,使得视频信息得以高效的存储和传输,对模拟视频系统而言也是无法实现的。

#### (4)集成度高、体积小、耗电量少、成本低

现代数字系统的元器件都具有很高的集成度,如 DSP 器件,采用  $0.075\mu\text{m}$  处理技术,可在图钉大小的单个芯片上集成 8 亿个以上的晶体管,FPGA 则可在单个芯片上集成几十上百万个门电路。超大规模集成电路的采用,使元器件和系统体积小,功能强、耗电量少,成本低。例如现代的手机,具有语音和视频通信、摄影、MP4 等强大功能,体积有的小到成为装饰品,待机时间长,并且由于它的生产成本低,价格便宜,得到了非常普遍的使用。

#### 5. 数字信号处理的应用

数字信号处理理论与技术在国民经济的各个部门都有广泛应用,包括通信、雷达、自动控制、网络、计算机、地球物理、声学、天文、生物医学、军事、消费电子产品等众多领域,极大地推动了这些领域的技术进步。表 0-1 总结了数字信号处理在许多方面的应用。由于每一个具体课题都有其特殊性,因此,如何应用数字信号处理的理论与技术成功地解决具体的实际问题,是广大科技工作者所面临的挑战,这也正是数字信号处理学科价值的体现。

表 0-1 数字信号处理的应用领域

| 汽车电子系统  | 消费电子产品                                 | 仪器控制    |
|---------|----------------------------------------|---------|
| 自适应车速控制 | 数字收音机/电视                               | 磁盘驱动控制  |
| 防滑刹车    | 教育玩具                                   | 引擎控制    |
| 移动电话    | 音乐合成器                                  | 激光打印机控制 |
| 数字收音机   | 传呼机                                    | 电机控制    |
| 发动机控制   | 电动工具                                   | 机器人控制   |
| 导航和全球定位 | 雷达探测器                                  | 伺服控制    |
| 振动分析    | 固态应答机 (solid-state answering machines) |         |
| 语音指令    |                                        |         |
| 防撞雷达装置  |                                        |         |
| 一般用途    | 图形/图像                                  | 工业      |
| 自适应滤波   | 三维图形旋转                                 | 数值控制    |
| 卷积      | 动画/数码特技                                | 电力线监视   |
| 相关      | 同态处理方法                                 | 机器人     |
| 数字滤波    | 图像压缩/传输                                | 安全访问    |
| 快速傅里叶变换 | 图像增强                                   |         |
| 希尔伯特变换  | 模式识别                                   |         |
| 波形产生    | 机器人视觉                                  |         |
| 加窗      | 工作站                                    |         |
| 仪器仪表    | 医疗                                     | 军事      |
| 数字滤波    | 诊断设备                                   | 图像处理    |
| 函数发生    | 胎儿监护仪                                  | 导弹制导    |
| 模式匹配    | 助听器                                    | 导航      |
| 锁相环     | 病人监护仪                                  | 雷达信号处理  |
| 地震数据处理  | 假肢                                     | 射频调制解调器 |
| 频谱分析    | 超声设备                                   | 安全通信    |
| 瞬态分析    |                                        | 声呐处理    |

(续表)

| 电 讯            |             | 语音处理    |
|----------------|-------------|---------|
| 1200~33 600bps | 传真          | 说话者确认   |
| 调制解调器          | 线路中继        | 语音增强    |
| 自适应均衡器         | 个人通信系统(PCS) | 语音识别    |
| 自适应差分脉冲编码      | 个人数码助理(PDA) | 语音合成    |
| 数字程控交换机        | 应答装置        | 文本-语音转换 |
| 数字语音插值技术(DSI)  | 扩频通信        | 语音邮件    |
| 双音多频信号的编码/解码   | 视频会议        |         |
| 回波消除           | X.25 分组交换   |         |
| 调制器            |             |         |
| 移动电话           |             |         |
| 频道复用           |             |         |
| 数据加密           |             |         |

资料来源: Texas Instruments, TMS320C54x DSP Reference Set, Volume 1: CPU and Peripherals, SPRU131G, March 2001.

# 第1章 离散时间信号与系统

## 1.1 离散时间信号

### 1.1.1 离散时间信号及其时域表示

离散时间信号在物理上是指定义在离散时间上的信号样品的集合,这样的样品集合可以是本来就存在的,也可以是由模拟信号通过采样得来的或者用计算机产生的。离散时间信号在数学上可用时间序列 $\{x(n)\}$ 来表示。其中 $x(n)$ 代表序列的第 $n$ 个样点的数字, $n$ 代表时间的序号, $n$ 的可取值范围为 $-\infty < n < \infty$ 的整数, $n$ 取其他值 $x(n)$ 没有意义。例如,如果信号样品的集合是通过对模拟信号 $x_a(t)$ 每隔 $T$ 时间等间隔地抽样而获得的 $\{x_a(nT)\}$ ,对于这种等间隔的抽样信号,在实际信号的存储与处理中,除了抽样率发生变化或者将抽样信号恢复成模拟信号时的情况外,时间间隔 $T$ 并不需要明显地表现出来,我们更注意的是抽样样品之间的相对位置,即时间序号 $n$ 。因此为了方便,通常将 $T$ 去掉而用时间序列 $\{x(n)\}$ 来代替 $\{x_a(nT)\}$ ,它在数值上与模拟信号的关系为

$$x(n) = x_a(nT) \quad (1-1-1)$$

在本书中,离散时间信号与序列将不予区分。表示离散时间信号的方法可采用枚举的方式。例如

$$\{x(n)\} = \{\dots, -1.5, -8.7, 2.53, 0.0, 6.7, 2.1, -5.6, \dots\}$$

↑

上面的箭头指定时间零点的位置。在上面表示的离散信号中有

$$x(-1) = -8.7, x(0) = 2.53, x(1) = 0.0, \dots$$

离散信号也可以用公式来表示,例如

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

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

离散信号还可以采用图形的方式来表示,如图1-1-1所示。图中横坐标 $n$ 表示离散的时间坐标,且仅在 $n$ 为整数时才有意义。纵坐标则代表信号样点的值。

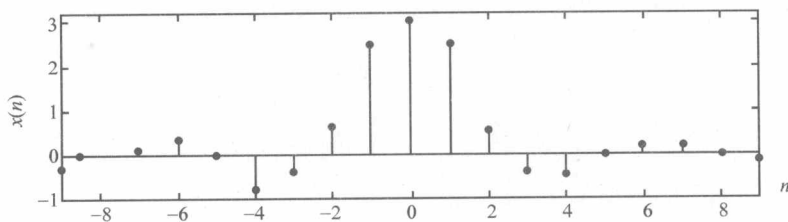


图1-1-1 离散信号的图形表示

许多时候为了方便,直接用  $x(n)$  来代表序列全体  $\{x(n)\}$ ,这时要根据情况注意区分  $x(n)$  指的是序列全体还是序列在  $n$  时刻的样值。如果序列为复数,则通常可将其分开用实部与虚部来表示,即

$$x(n) = x_R(n) + jx_I(n)$$

### 1.1.2 序列的基本运算

离散信号处理中有以下几种最基本的运算。

#### 1. 序列的加减

序列的加减指将两序列序号相同的数值相加减,即

$$y(n) = x_1(n) \pm x_2(n)$$

#### 2. 序列的乘积

序列的乘积指将两序列序号相同的数值相乘,即

$$y(n) = x_1(n) \cdot x_2(n)$$

如图 1-1-2 所示为序列的加和乘的示意图。

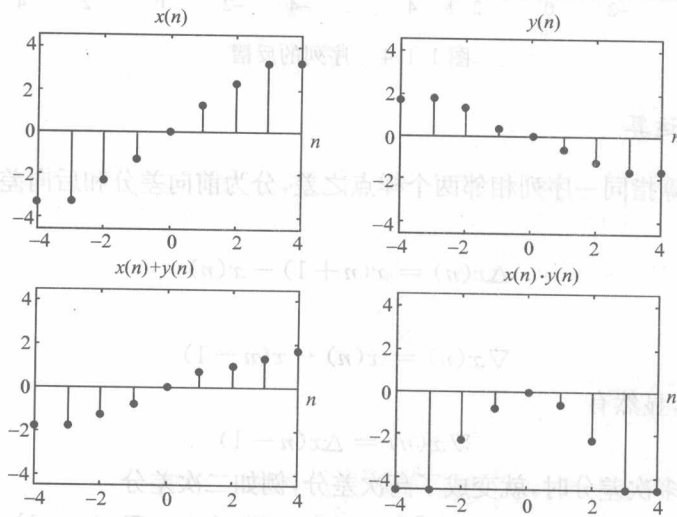


图 1-1-2 序列的加和乘

#### 3. 序列的延时

序列的延时是将序列全体在时间轴上移动,即

$$y(n) = x(n - n_0)$$

$n_0 < 0$  左移,  $n_0 > 0$  右移,如图 1-1-3 所示。

#### 4. 序列乘常数

序列乘以常数指将序列的每一个值都乘以常数,即

$$y(n) = ax(n)$$