



高等学校电子与通信工程类专业“十二五”规划教材

# 数字信号处理

## —— 基于数值计算

主编 郑佳春 陈仅星 陈金西



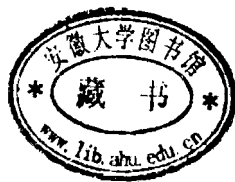
西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

高等学校电子与通信工程类专业“十二五”规划教材

# 数字信号处理

## ——基于数值计算

主编 郑佳春 陈仅星 陈金西



西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了数字信号处理的基本理论和算法,给出了利用 MATLAB 在计算机上实现数字信号处理系统分析、设计、计算的实例。全书包括三大部分:① 离散时间信号和离散时间系统分析,主要介绍离散时间傅立叶变换(DTFT)、Z 变换、有限长序列离散傅立叶变换及其快速傅立叶变换(FFT)算法;② 数字信号处理系统设计,主要介绍无限长单位脉冲响应数字滤波器(IIR DF)、有限长单位脉冲响应数字滤波器(FIR DF)的设计;③ 数字信号处理系统的实现,主要介绍数字信号处理系统的网络结构、有限字长量化与运算效应等对数字信号处理系统性能的影响,抽取、内插的 FIR 结构,并提供实验教程。

本书的重点为基本理论和基本设计,强调对基本概念及其物理意义的透彻理解;书中大量使用基于 MATLAB 的应用实例,既有利于反映数字信号处理的最新发展,又便于读者进行仿真实验,检验所学内容,加深对相关内容的理解。

本书结构体系新颖,内容取舍适度,阐述通俗易懂,可作为高等院校电子信息工程、通信工程、电子科学与技术、自动化、电气工程及其自动化、计算机应用、物联网工程、生物医学工程等专业本科生的教材,也可作为其他专业本科生和研究生的选修课教材,还可供从事信号与信息处理的科技工作者参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理:基于数值计算/郑佳春,陈仅星,陈金西主编.

—西安:西安电子科技大学出版社,2013.3

高等学校电子与通信工程类专业“十二五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3034 - 2

I. ① 数… II. ① 郑… ② 陈… ③ 陈… III. ① 数字信号处理—高等学校—教材

IV. ① TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 041532 号

策 划 邵汉平

责任编辑 邵汉平

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2013 年 3 月第 1 版 2013 年 3 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 18

字 数 426 千字

印 数 1~3000 册

定 价 32.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3034 - 2/TN

**XDUP 3326001 - 1**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

# 前 言

数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)已成为通信、电子信息、计算机科学等专业学生必须掌握的专业基础知识和必修内容,也是教育部规定的工科院校多数专业必修课程之一。但从大多数开设该课程院校的教学结果来看,很多学生虽然修了该课程,也通过了考试,却对数字信号处理的基本概念、物理意义一知半解,缺乏系统的认识与理解,也难以利用所学理论解决实际的工程问题。分析其中原因,主要有:

(1) 现在使用的数字信号处理教材大都是纯数学推导,非常抽象,可读性普遍较差,很难引起读者的阅读兴趣。

(2) 大部分数字信号处理教材对信号处理算法的物理意义缺乏清晰的描述,也缺少实际工程应用的实例。

(3) 数字信号处理是一门实践性很强的学科,很多现实问题从信号处理的观点看很简单,但多数学生虽然掌握了一定的信号处理理论,却对现实问题缺乏了解,很难用信号处理理论解决现实问题。

针对上述问题,我们利用 MATLAB 工具软件,从数值计算的角度出发编写了本书。本书主要阐述数字信号处理的经典理论,在理论分析上尽量减少数学推导和数学表达式描述,而充分利用时域与频域可视化波形图直观显示,对数字信号处理的基本概念尽量赋予清晰的物理意义,并通过实例将理论应用于工程实践,真正达到对数字信号处理理论的深入浅出表述,使教材通俗易懂,便于自学。

数字信号处理经过多年的发展,体系庞杂,内容非常丰富。本书只介绍数字信号处理的基础部分,即常称的“经典”部分。全书内容安排如下:

第 1 章:离散时间信号与系统,主要介绍模拟信号的数字处理过程的基本概念、实现的方法及特点;离散时间信号(序列)的表示,典型序列,序列的运算,连续时间信号的采样,采样定理;离散时间系统的差分方程描述,线性、时不变性,稳定性与因果性;离散时间系统的状态方程描述;离散时间系统的时域分析;离散线性时不变系统的单位样值响应,线性卷积,离散时间系统的 MATLAB 分析等。

第 2 章:离散时间信号与系统的频域分析,主要介绍序列的变换域分析方法,包括序列的傅立叶变换,序列的  $Z$  变换及其逆变换; $Z$  变换的应用,离散系统的传递函数,系统的零极点及频率响应特性, MATLAB 分析方法。

第 3 章:离散傅立叶变换及其应用,主要介绍离散傅立叶变换(DFT)的定义、性质,频率域采样,循环卷积;快速傅立叶变换(FFT)减少运算量的思路,基 2-FFT 算法的 DIT-FFT 与 DIF-FFT,序列长度  $N$  为组合数的 FFT 算法,离散傅立叶变换 DFT 的实际应用问题;快速傅立叶变换 FFT 典型用法。

第 4 章:无限长单位脉冲响应数字滤波器设计,主要介绍模拟滤波器的设计,脉冲响应不变法设计 IIR 数字低通滤波器,双线性变换法设计 IIR 数字低通滤波器,数字高通、带通、带阻 IIR 滤波器的设计, FIR 数字滤波器的 MATLAB 设计。

第 5 章:有限长单位脉冲响应数字滤波器设计,主要介绍线性相位 FIR 数字滤波器的

条件和特点,窗函数法设计 FIR 滤波器,频率采样法设计 FIR 滤波器, FIR 滤波器的最优化设计、MATLAB 设计, IIR 与 FIR 数字滤波器比较。

第 6 章: 数字信号处理系统的实现, 主要介绍用信号流图表示的网络结构, 无限长脉冲响应系统的网络结构, 有限长脉冲响应系统的网络结构, 格形结构; A/D 量化、量化误差, 运算中的有限字长效应, 极限环振荡, 系数量化效应。

第 7 章: 多采样率信号处理, 主要介绍采样率降低, 采样率提高, 抽取、内插的 FIR 结构, 过采样技术等。

第 8 章: 实验教程。

这些章节中, 第 1、2、3 章是数字信号与系统的时域与频域分析的基础理论部分, 以频域采样为基础, 重点讲述基于数值计算的频域分析方法。第 4 章和第 5 章介绍数字滤波器的设计问题, 重点讲述基于 MATLAB 编程计算的经典数字滤波器的设计方法, 是数字信号处理系统设计最为基础的理论。第 6 章和第 7 章介绍数字滤波器实现理论, 重点讨论数字滤波器实现时, 影响系统性能的因素, 包括滤波器的网络结构、量化误差、有限字长运算量化效应, 采样率变换与结构、性能的关系。本书各章都安排了相关的应用实例, 并给出了完整的 MATLAB 分析代码。为了突出直观性, 全书给出了约 200 幅图片来说明数字信号处理的基本原理与应用。

在编写的过程中, 我们尽量以通俗的语言和实例来说明信号处理基本概念、算法的物理意义。在追求理论分析完整性的前提下, 尽量将经典的数字信号处理理论寓于工程实践中, 努力将信号处理理论与实际应用之间紧密结合。

本书第 1、2、3 章由集美大学陈仅星编写, 第 4 章和第 5 章由厦门理工学院陈金西编写, 第 6、7、8 章及其他部分由集美大学郑佳春编写。郑佳春还负责全书的统稿和审定工作。

限于作者的水平和经验, 书中难免存在疏漏或者不足之处, 恳请各位专家和读者批评指正。

编 者  
2012. 12

# 目 录

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 绪论 .....                         | 1  |
| 第 1 章 离散时间信号与系统 .....            | 5  |
| 1.0 引言 .....                     | 5  |
| 1.1 离散时间信号 .....                 | 5  |
| 1.1.1 序列的表示 .....                | 5  |
| 1.1.2 序列的运算 .....                | 10 |
| 1.2 连续时间信号的采样 .....              | 11 |
| 1.2.1 连续信号的采样过程 .....            | 11 |
| 1.2.2 具有低通型频谱连续的信号的采样 .....      | 12 |
| 1.2.3 具有带通型频谱的连续信号的采样 .....      | 14 |
| 1.3 离散时间系统 .....                 | 18 |
| 1.3.1 系统的线性、时不变性、稳定性与因果性 .....   | 19 |
| 1.3.2 离散时间系统的差分方程描述 .....        | 19 |
| 1.3.3 离散时间系统的状态方程描述 .....        | 20 |
| 1.4 离散时间系统的时域分析 .....            | 22 |
| 1.4.1 离散线性时不变系统的单位样值响应 .....     | 22 |
| 1.4.2 线性卷积 .....                 | 23 |
| 1.4.3 离散时间系统的 MATLAB 分析 .....    | 25 |
| 习题一 .....                        | 26 |
| 第 2 章 离散时间信号与系统的频域分析 .....       | 29 |
| 2.1 引言 .....                     | 29 |
| 2.2 序列的傅立叶变换 .....               | 29 |
| 2.2.1 DTFT 定义和性质 .....           | 29 |
| 2.2.2 周期序列及其傅立叶级数表示 .....        | 33 |
| 2.2.3 序列的周期卷积 .....              | 35 |
| 2.3 序列的 Z 变换 .....               | 36 |
| 2.3.1 Z 变换定义 .....               | 37 |
| 2.3.2 逆 Z 变换 .....               | 38 |
| 2.3.3 Z 变换的性质与 Parseval 定理 ..... | 39 |
| 2.4 Z 变换的应用 .....                | 41 |
| 2.4.1 离散系统的系统函数 .....            | 41 |
| 2.4.2 系统的零极点及频率响应特性 .....        | 42 |
| 习题二 .....                        | 44 |
| 第 3 章 离散傅立叶变换及其应用 .....          | 46 |
| 3.1 引言 .....                     | 46 |
| 3.2 离散傅立叶变换 .....                | 46 |
| 3.2.1 DFT 定义 .....               | 46 |

|              |                                     |            |
|--------------|-------------------------------------|------------|
| 3.2.2        | DFT 性质 .....                        | 50         |
| 3.2.3        | 频率域采样 .....                         | 56         |
| 3.2.4        | 循环卷积定理 .....                        | 59         |
| 3.3          | 快速傅立叶变换 FFT .....                   | 62         |
| 3.3.1        | 减少运算量的思路 .....                      | 62         |
| 3.3.2        | 基 2-FFT 算法 .....                    | 63         |
| 3.3.3        | $N$ 为组合数的 FFT 算法 .....              | 69         |
| 3.3.4        | Chirp-Z 变换 .....                    | 71         |
| 3.4          | 离散傅立叶变换的实际应用问题 .....                | 73         |
| 3.4.1        | 频谱泄漏(leakage) .....                 | 73         |
| 3.4.2        | 分辨率及补零方法 .....                      | 75         |
| 3.4.3        | DFT 的处理增益 .....                     | 77         |
| 3.5          | 快速傅立叶变换 FFT 典型用法 .....              | 79         |
| 3.5.1        | IDFT 的快速算法 .....                    | 79         |
| 3.5.2        | 实数序列的 FFT .....                     | 79         |
| 3.5.3        | 线性卷积的 FFT 计算 .....                  | 81         |
| 3.5.4        | 相关函数的 FFT 计算 .....                  | 84         |
| 3.5.5        | 用 FFT 计算二维离散的傅立叶变换 .....            | 87         |
| 习题三          | .....                               | 88         |
| <b>第 4 章</b> | <b>无限长单位脉冲响应数字滤波器设计 .....</b>       | <b>94</b>  |
| 4.1          | 数字滤波器的基本概念 .....                    | 94         |
| 4.1.1        | 数字滤波器的分类 .....                      | 94         |
| 4.1.2        | 数字滤波器的技术指标 .....                    | 95         |
| 4.1.3        | 数字滤波器设计方法概述 .....                   | 96         |
| 4.2          | 模拟滤波器的设计 .....                      | 97         |
| 4.2.1        | 模拟低通滤波器的技术指标及逼近方法 .....             | 97         |
| 4.2.2        | 巴特沃兹滤波器 .....                       | 98         |
| 4.2.3        | 切比雪夫滤波器 .....                       | 104        |
| 4.2.4        | 椭圆滤波器(考尔滤波器) .....                  | 107        |
| 4.2.5        | 模拟高通、带通、带阻滤波器设计 .....               | 108        |
| 4.3          | 利用模拟滤波器设计 IIR 数字滤波器 .....           | 113        |
| 4.3.1        | 脉冲响应不变法 .....                       | 114        |
| 4.3.2        | 双线性变换法 .....                        | 117        |
| 4.3.3        | 用 MATLAB 实现模拟滤波器变换到 IIR 数字滤波器 ..... | 120        |
| 4.4          | 从模拟低通原型到各种数字滤波器的频率变换 .....          | 121        |
| 4.4.1        | 低通变换 .....                          | 121        |
| 4.4.2        | 高通变换 .....                          | 126        |
| 4.4.3        | 带通变换 .....                          | 129        |
| 4.4.4        | 带阻变换 .....                          | 133        |
| 4.4.5        | MATLAB 中直接设计 IIR 数字滤波器的函数介绍 .....   | 134        |
| 习题四          | .....                               | 138        |
| <b>第 5 章</b> | <b>有限长单位脉冲响应数字滤波器的设计 .....</b>      | <b>140</b> |
| 5.1          | 线性相位 FIR 数字滤波器的特性 .....             | 140        |

|                                    |            |
|------------------------------------|------------|
| 5.1.1 线性相位的条件 .....                | 140        |
| 5.1.2 线性相位 FIR 滤波器的幅度特性 .....      | 141        |
| 5.1.3 线性相位 FIR 滤波器的零点特性 .....      | 146        |
| 5.2 窗函数设计法 .....                   | 147        |
| 5.2.1 矩形窗函数设计法 .....               | 148        |
| 5.2.2 几种常用的窗函数 .....               | 151        |
| 5.2.3 窗函数法设计举例 .....               | 155        |
| 5.3 频率采样法 .....                    | 160        |
| 5.3.1 设计方法 .....                   | 160        |
| 5.3.2 逼近误差 .....                   | 161        |
| 5.3.3 MATLAB 辅助设计 .....            | 165        |
| 5.4 FIR 数字滤波器的最优化设计 .....          | 168        |
| 5.4.1 最优设计准则 .....                 | 169        |
| 5.4.2 切比雪夫最佳一致逼近 .....             | 170        |
| 5.5 IIR 与 FIR 数字滤波器的比较 .....       | 175        |
| 5.6 MATLAB 中的滤波器设计工具 FDATool ..... | 176        |
| 5.6.1 FDATool 使用环境介绍 .....         | 176        |
| 5.6.2 利用 FDATool 设计数字滤波器 .....     | 179        |
| 5.6.3 FDATool 的设计数据输出 .....        | 180        |
| 习题五 .....                          | 183        |
| <b>第 6 章 数字信号处理系统的实现</b> .....     | <b>186</b> |
| 6.1 数字滤波器的网络结构 .....               | 186        |
| 6.1.1 数字网络的信号流图表示 .....            | 186        |
| 6.1.2 IIR 数字滤波器的结构 .....           | 188        |
| 6.1.3 FIR 数字滤波器网络结构 .....          | 191        |
| 6.2 数字信号处理中的量化效应 .....             | 196        |
| 6.2.1 量化噪声 .....                   | 196        |
| 6.2.2 A/D 变换的量化效应 .....            | 198        |
| 6.2.3 量化噪声通过线性系统 .....             | 199        |
| 6.2.4 有限字长运算对数字滤波器的影响 .....        | 200        |
| 6.2.5 系数量化对滤波器特性的影响 .....          | 204        |
| 习题六 .....                          | 208        |
| <b>第 7 章 多采样率信号处理</b> .....        | <b>210</b> |
| 7.1 采样率降低 .....                    | 210        |
| 7.2 采样率提高 .....                    | 215        |
| 7.3 抽取与内插的 FIR 结构 .....            | 218        |
| 7.3.1 抽取的 FIR 结构 .....             | 219        |
| 7.3.2 内插的 FIR 结构 .....             | 220        |
| 7.4 采样率变换在 A/D 和 D/A 转换器中的应用 ..... | 221        |
| 7.4.1 过采样 A/D 和 D/A 转换器 .....      | 221        |
| 7.4.2 噪声抑制技术 .....                 | 222        |
| 7.5 正交镜像滤波器组 .....                 | 225        |
| 7.5.1 正交镜像滤波器组 .....               | 226        |



|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| 7.5.2 基于 FIR 滤波器的 QMF 公共低通滤波器设计 .....  | 228 |
| 7.6 树状结构滤波器组 .....                     | 230 |
| 7.6.1 倍频程分隔的分析滤波器组 .....               | 230 |
| 7.6.2 倍频程分隔的综合滤波器组 .....               | 232 |
| 7.6.3 两通道 PR QMF 滤波器组的 MATLAB 设计 ..... | 232 |
| 习题七 .....                              | 235 |
| <b>第 8 章 实验教程</b> .....                | 237 |
| 8.1 实验一 时域离散信号与系统分析 .....              | 237 |
| 8.1.1 实验目的 .....                       | 237 |
| 8.1.2 实验原理与方法 .....                    | 237 |
| 8.1.3 实验内容 .....                       | 239 |
| 8.1.4 思考题 .....                        | 240 |
| 8.1.5 部分参考程序(MATLAB 语言) .....          | 240 |
| 8.2 实验二 离散傅立叶变换及其应用 .....              | 241 |
| 8.2.1 实验目的 .....                       | 241 |
| 8.2.2 实验原理与前期准备 .....                  | 241 |
| 8.2.3 实验内容 .....                       | 242 |
| 8.2.4 思考题 .....                        | 243 |
| 8.2.5 部分参考程序 .....                     | 243 |
| 8.3 实验三 IIR 数字滤波器设计 .....              | 250 |
| 8.3.1 实验目的 .....                       | 250 |
| 8.3.2 实验原理与方法 .....                    | 250 |
| 8.3.3 实验内容 .....                       | 252 |
| 8.3.4 思考题 .....                        | 252 |
| 8.3.5 参考程序(MATLAB 语言) .....            | 253 |
| 8.4 实验四 FIR 数字滤波器设计 .....              | 256 |
| 8.4.1 实验目的 .....                       | 256 |
| 8.4.2 实验原理与方法 .....                    | 256 |
| 8.4.3 实验内容 .....                       | 258 |
| 8.4.4 思考题 .....                        | 258 |
| 8.4.5 实验参考程序(MATLAB 语言) .....          | 259 |
| 8.5 MATLAB 数字信号处理基础 .....              | 263 |
| 8.5.1 数组(序列) .....                     | 263 |
| 8.5.2 向量及其生成 .....                     | 265 |
| 8.5.3 运算符和特殊字符 .....                   | 266 |
| 8.5.4 MATLAB 语言结构 .....                | 267 |
| 8.5.5 常用函数 .....                       | 268 |
| 8.5.6 MATLAB 绘图 .....                  | 270 |
| 8.5.7 MATLAB 程序设计 .....                | 273 |
| <b>参考文献</b> .....                      | 280 |

# 结 论

## 1. 数字信号处理的基本概念

几乎所有的工程领域都要应用到信号处理技术理论。信号(Signal)，从数学的角度来说是独立变量的函数，这个变量可以是时间、位移、周期、频率、相位、二维坐标、空间坐标等。只有一个变量的信号称为一维信号，有两个变量的信号称为二维信号，有多个变量的信号称为多维信号。例如，3D(Three Dimensions)信号为三维，有三个坐标，如长、宽、高等。信号的表现形式有电、磁、光、声、热、机械等。本书所讨论的信号主要是以时间为自变量、以幅度为函数值的时间信号，它可以分为以下几种类型：

(1) 连续信号(即模拟信号)：在某个时间区间，除有限间断点外所有瞬时均有确定值，该信号时间和幅度均连续。

(2) 离散时间信号：时间上不连续，幅度连续。

(3) 数字信号：时间和幅度均不连续。

所谓“信号处理”，就是把记录在某种媒体上的信号进行处理，抽取出有用信息的过程。它是对信号进行提取、变换、分析、综合、估值与识别等处理过程的统称。数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)是通过计算机或专用处理设备，用数值计算(运算)方式去处理数字信号(序列)，提取有用信息，去除干扰和杂波的过程。例如，对信号的滤波，提取和增强信号的有用分量，削弱无用的分量；或是估计信号的某些特征参数等。因此，凡是与用数值计算的方法对数字信号进行滤波、变换、增强、压缩、估计、识别等处理有关的问题，都是数字信号处理的研究对象。

## 2. 数字信号处理系统的组成

一般地讲，我们通常所获取的信号都为模拟信号，因此数字信号处理通常涉及三个步骤：

(1) 模/数转换(A/D转换)：把模拟信号变成数字信号，是一个对自变量及其幅值同时进行离散化的过程，基本的理论保证是采样定理。

(2) 数字信号处理(DSP)：包括变换域分析(如频域变换)、数字滤波、识别、合成等处理。

(3) 数/模转换(D/A转换)：把经过处理的数字信号还原为模拟信号。通常，这一步并不是必需的。

一个数字信号处理系统的组成如图 0.1 所示。当然实际的系统并不一定要包括其中所有的部分。例如，有些系统只需数字输出，可直接以数字形式显示或打印，那么就不需要 D/A 变换器。还有一些系统，输入的是数字量，因而就不需要 A/D 变换器。对于纯数字系统，则只需要 A/D 及 D/A 变换器之间的核心部分就行了。

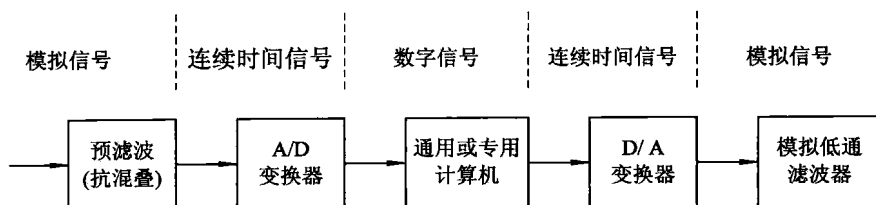


图 0.1 数字信号处理系统的组成

### 3. 数字信号处理的学科概貌

数字信号处理通常分为经典数字信号处理和现代数字信号处理。经典数字信号处理的学科概貌如图 0.2 所示。其中，离散时间信号与系统可分为时域分析和频域分析。时域分析主要是系统的线性时(移)不变性、因果稳定性和系统的输入输出关系理论。

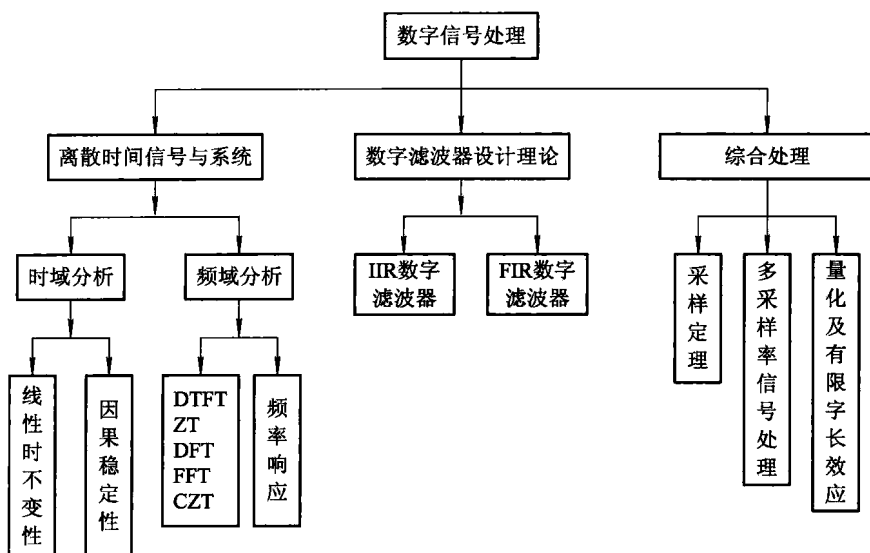


图 0.2 经典数字信号处理学科概貌

频域分析包括两部分内容：

(1) 确定信号的频谱分析，可采用离散时间傅立叶变换(DTFT)、Z变换(ZT)、离散傅立叶变换(DFT)及其快速算法(FFT)等分析方法，对于较复杂的情况，可采用线性调频Z变换(CZT)进行分析。

(2) 随机信号的频谱分析，采用统计的谱分析方法。

实际频谱分析技术中都要用到快速傅立叶变换(FFT)和一些快速卷积算法。FFT还可用来实现FIR数字滤波运算，而统计频谱分析法又可用于研究数字信号处理系统的量化噪声效应。

数字滤波器设计理论则分为无限长单位脉冲响应(IIR)数字滤波器和有限长单位脉冲响应(FIR)数字滤波器设计理论，包括它们的数学逼近问题、线性相位问题以及具体的硬件或软件实现问题。

综合处理包括：采样技术、采样定理，多采样率信号处理；量化、数字滤波器网络结

构、有限字长运算量化效应等问题。

现代数字信号处理的研究热点集中在对时变非线性系统、非平稳信号、非高斯信号的处理上。处理方法和相关理论有自适应滤波、估值理论、信号建模、离散小波变换、高阶矩分析、盲处理、分形、混沌理论等；同时，二维和多维信号的处理也是最新发展的领域。

#### 4. 数字信号处理的特点

数字信号处理系统具有以下一些明显的优点：

(1) 精度高。模拟系统的精度由元器件决定，模拟元器件的精度很难达到  $10^{-3}$  以上，而 17 位字长的数字系统其精度可以达到  $10^{-5}$ 。例如：基于离散傅立叶变换的数字式频谱分析仪，其幅值精度和频率分辨率均远高于模拟频谱分析仪。

(2) 灵活性高。数字系统的性能主要由乘法器的系数决定，而系数是存放在系数存储器中的，只需改变存储的系数，就可得到不同的系统，比改变模拟系统方便得多。例如：软件无线电技术的实现等。

(3) 可靠性强。数字系统只有“0”、“1”两个信号电平，因而受周围环境温度以及噪声的影响较小，而模拟系统中电平是连续变化的，易受温度、噪声、电磁感应等的影响。如果数字系统采用大规模集成电路实现，则可靠性更高。

(4) 容易大规模集成。这是由于数字部件有高度规范性，便于大规模集成、大规模生产，对电路参数要求不严，故产品成品率高。尤其是对于低频信号，例如地震波分析，需要过滤几赫兹到几十赫兹信号，用模拟系统处理时，电感器、电容器的数值、体积和重量都非常大，性能亦不能达到要求，而数字信号处理系统在这个频率处却非常优越。

(5) 时分复用。利用数字信号处理器可以同时处理几个通道的信号。处理器运算速度越高，能处理的信道数目也就越多。

(6) 可获得高性能指标。例如：有限长单位脉冲响应(FIR)数字滤波器可以实现严格的线性相位；在数字信号处理中可以将信号存储起来，用延迟的方法实现非因果系统，从而提高了系统的性能指标；数据压缩方法可以大大减少信息传输中的信道容量等。

(7) 二维与多维处理。利用庞大的存储单元，可以存储一帧或数帧图像信号，实现二维甚至多维信号处理，包括二维或多维滤波、二维及多维谱分析等。例如：物联网的 ID 卡、二维码，图像处理的 2D、3D、4D 动画，以及电影技术等。

数字信号处理系统也有其局限性，例如，数字系统的速度还不够高，尚不能处理很高频率的信号。另外，系统比较复杂，价格昂贵等也是其缺点。

#### 5. 数字信号处理的应用

随着数字信号处理理论的发展和数字信号处理器(DSP)数据运算处理能力的不断增强，数字信号处理技术已经广泛应用于电子信息领域，特别是在通信、语音信号处理、网络、工业控制等领域，概括起来有以下几个方面：

(1) 语音信号处理：语音编码、语音合成、语音识别、语音增强、语音邮件、语音储存等。

(2) 常用电器设备：智能手机、数字音响、电视、可视电话、A/V 设备、照(摄)像机、打印机、扫描仪、音乐合成器、音调控制器、玩具与游戏机等。

(3) 仪器仪表：数字滤波、频谱分析、函数发生、数据采集、地震预报等。

(4) 图像处理：二维和三维图形处理、图像压缩与传输、多媒体、机器人视觉、动画、电子地图、图像识别、图像增强等。

(5) 工业控制：自动控制、机器人控制、磁盘控制、在线监控等。

(6) 通信：移动通信、无线电、传真、电视会议、数字蜂窝电话、数据加密、数据压缩、调制解调器、自适应设备、线路转发器、回波抵消、多路复用等。

(7) 军事：系统故障检测、保密通信、雷达信号处理、声呐信号处理、遥感、遥测、卫星导航、全球定位系统、跳频通信、搜索和反搜索等。

(8) 医疗：超声设备、诊断设备、病人监护、助听、心电图等。

## **6. 本书内容安排**

本书第 1、2 章讲述数字信号与系统的时域、频域分析的基本原理与方法，大部分属于信号与系统课程内容，起着承上启下的作用。第 3 章论述离散傅立叶变换及其快速傅立叶变换，引入频率域采样概念，使频域分析可以采用基于数值计算的方法实现。第 4 章和第 5 章介绍数字滤波器的设计理论，对基于 MATLAB 编程的经典数字滤波器设计方法进行介绍。第 6 章和第 7 章是数字滤波器实现的综合理论，详细分析和讨论数字滤波器实现时影响系统性能的因素，包括数字滤波器的网络结构，A/D 转换量化误差、有限字长运算量化效应，采样率变换与结构、性能的关系等。

本书的应用实例都是基于 MATLAB 2010 软件的，因此，阅读本书前读者最好学习一下 MATLAB 2010。希望读者提前自学并安装 MATLAB 2010 软件或者更高级的版本，学习过程中，可以随时运行书中例程，验证、分析与研究程序运行结果，以增加感性认识，理解数字信号处理算法的基本原理，提高学习效果。

# 第 1 章 离散时间信号与系统

## 1.0 引言

正如本书绪论所指出的，在用数字方法处理信号的过程中，所有的信号都是离散时间信号，并采用序列来表达，而运算加工这些序列的系统则用差分方程描述。这些基本概念尽管已经在“信号与系统”课程中介绍过，但它是学习数字信号处理的基础，因此，有必要在此进行简单回顾。本章重点讨论如下几个问题：离散时间信号与连续时间信号的差异；离散时间信号与数字信号之间的不同；怎样由计算机来构成离散系统；在数字信号处理的过程中系统的性能还会受到哪些因素的制约，等等。同时借助广为流行的 MATLAB 工具进行离散系统分析与仿真，以加深理解和掌握这些概念。

现实世界中的各种信号绝大多数是以模拟信号(Analog Signal)形式出现的，模拟信号数字化处理的一般过程如图 1.1.0 所示。这一处理过程看似花费了许多硬件环节和软件成本，却能获得优异的性能和高度的灵活性。我们将在随后的章节陆续详细介绍。

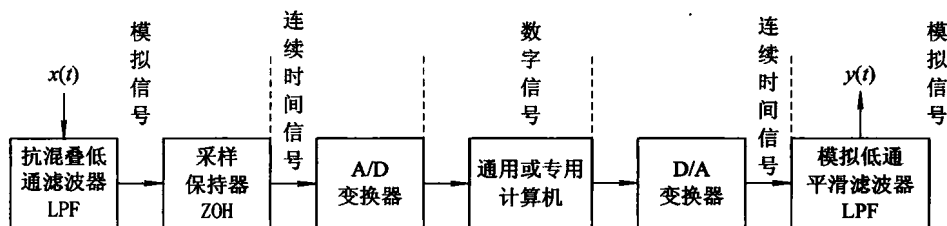


图 1.1.0 模拟信号数字化处理的一般过程

## 1.1 离散时间信号

### 1.1.1 序列的表示

在信号理论中，离散时间信号一般采用序列来描述，记为  $\{x(n)\}$ 。序列是时间上不连续的一串样本值的集合，其中序号  $n$  是整数，而  $x(n)$  则是第  $n$  号样本值，大括号用来表示全部样本的集合。

一个无限长复数值的序列如下：

$$\{x(n)\} = \{\cdots, 2 + j3, 0.8 + j2, 1 - j5, 4, 0.3 + j4, -j2.7, \cdots\}, n \in (-\infty, \infty)$$

↑

其中, 用箭头标出了  $n=0$  的序号位置, 即序列原点值  $x(0)=1-j5$ , 那么,  $x(-1)=0.8+j2$ ,  $x(1)=4$ ,  $x(2)=0.3+j4$  等, 依此类推。显然, 该复序列可以分解成实部子序列  $\{x_{\text{Re}}(n)\}$  和虚部子序列  $\{x_{\text{Im}}(n)\}$ 。在不引起混淆的前提下, 常可省略花括号。序列的实部为

$$x_{\text{Re}}(n) = \{\dots, 2, 0.8, 1, 4, 0.3, 0, \dots\}$$

↑

虚部为

$$x_{\text{Im}}(n) = \{\dots, 3, 2, -5, 0, 4, -2.7, \dots\}$$

↑

显然有  $x(n)=x_{\text{Re}}(n)+jx_{\text{Im}}(n)$ , 其对应的复共轭序列为  $x^*(n)=x_{\text{Re}}(n)-jx_{\text{Im}}(n)$ 。当然  $x(n)$  还可以写成幅度序列与相位序列的形式, 请读者思考并写出。

实际工程中, 离散时间序列  $x(n)$  经常是从连续时间信号  $x(t)$  通过采样得到的。假设在均匀采样情况下, 采样时间间隔为  $T_s$ , 亦即采样频率  $f_s=1/T_s$ , 则

$$x(n) = x(t) \big|_{t=nT_s} = x(nT_s) \quad (1.1.1)$$

如果把采样时间间隔  $T_s$  归一化, 即看成是  $T_s=1$  个单位, 那么, 用一个  $N$  点的离散序列  $x(n)$  就可以代表不同持续时间长度 ( $NT_s$ ) 的连续信号片段, 它仅与实际的  $T_s$  有关。另外, 还应注意到, 序列点之间所对应的连续信号的真正幅度值是多少, 是无从知晓的, 实际上也不用关心。

下面介绍几个常用的典型序列。

(1) 单位脉冲序列  $\delta(n)$ , 又称为单位样值函数。

$$\delta(n) = \begin{cases} 1, & n = 0 \\ 0, & n \neq 0 \end{cases} \quad (1.1.2)$$

该序列只在原点处取得单位 1 的值, 其余点全都是 0 值。单位脉冲序列可用 MATLAB 语言描述如下:

```
n=-30:30;    %给出从-30到30共61个自然序号
x=[n==0];    %在原点处取得1
stem(n,x);    %绘出序列图
```

程序运行结果如图 1.1.1 所示, 在  $n=0$  的位置出现值为 1 的脉冲。当序列长度选得大些时, 就更加逼近理想的数学上的单位样值函数。

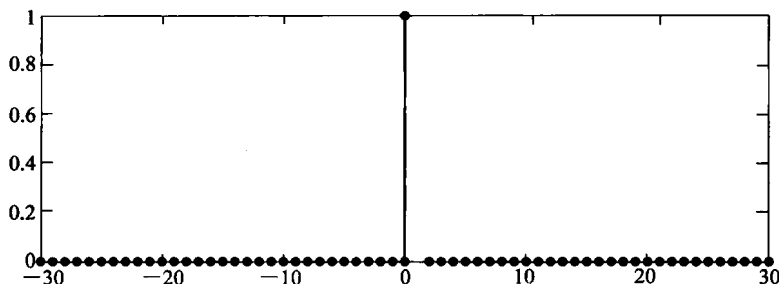


图 1.1.1  $\delta(n)$  的图形

注意: 单位脉冲序列与连续时间系统中单位冲激信号  $\delta(t)$  的区别, 那里的符号  $\lim_{t \rightarrow 0} \delta(t) \rightarrow \infty$ , 是一个极限的概念, 是对极短时间内幅值巨大的冲激现象的抽象表达, 并非现实中的

信号。

(2) 单位阶跃序列  $u(n)$ 。

$$u(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases} \quad (1.1.3)$$

延迟  $M$  个序号的单位阶跃序列为

$$u(n-M) = \begin{cases} 1, & n \geq M \\ 0, & n < M \end{cases} \quad (1.1.4)$$

用 MATLAB 语言可描述如下：

```
n=1:40;           %给出自然序号 1 到 40
M=15;             %延迟值
x=[(n-M)>=0];     %获得从 M 开始后的共 25 个 1 值的行向量
stem(n, x);       %绘出序列图
```

绘出的序列图如图 1.1.2 所示。

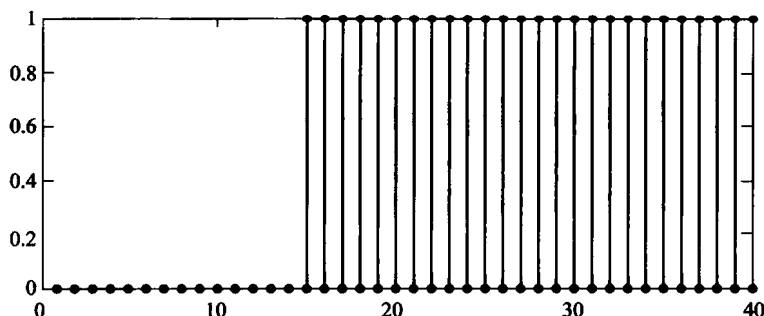


图 1.1.2 延迟的单位阶跃序列  $\delta(n-M)$

(3)  $N$  点矩形窗序列  $R_N(n)$ 。

$$R_N(n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & n < 0, \quad n \geq N \end{cases} \quad (1.1.5)$$

显然,  $R_N(n) = u(n) - u(n-N)$ 。一个序列若乘以矩形窗, 相当于窗外数据被忽略成 0, 因此, 经常用  $R_N(n)$  来截取长序列中感兴趣的一段内容。

(4) 实指数序列。

$$x(n) = a^n u(n) \quad a \neq 0 \quad (1.1.6)$$

当任意实数  $|a| < 1$  时, 序列收敛, 其总和为  $\sum_{n=0}^{\infty} a^n = \frac{1}{1-a}$ ; 当  $|a| < 1$  时, 其前有限  $N$  项和为  $\sum_{n=0}^{N-1} a^n = \frac{1-a^N}{1-a}$ ; 但当  $|a| > 1$  时,  $x(n)$  序列发散。而当  $a=1$  时,  $x(n)$  退化成单位阶跃  $u(n)$ ; 当  $a=-1$  时,  $x(n)$  成为正负 1 交替的序列, 它在序列变换里经常会用到。

(5) 复指数序列。

$$x(n) = (re^{j\omega_0})^n = r^n [\cos(\omega_0 n) + j\sin(\omega_0 n)] \quad (1.1.7)$$

大家知道, 尽管现实中不存在复信号, 但在信号分析理论中, 复信号概念的引入带来了信号表示的巨大便利, 特别是在傅立叶变换中。复序列要用实部和虚部共同表示, 也可以用幅度和相位来表示。因此, 习惯上图形表示需要绘制两张平面图, 否则就要绘制一张



3 坐标的立体图。复指数序列尤为重要，绝大多数序列都可以由它来构造。

**【例 1.1.1】** 绘制因果复序列  $x(n) = (0.732e^{j0.523})^n u(n) = (0.732)^n (\cos 0.523n + j \sin 0.523n) u(n)$  的两种表示方式的图形。

**解** 用 MATLAB 绘图编程如下：

```
n=0:30; %绘制 31 个点因果序列
x=(0.732.^n).*(exp(j*0.523*n)); %注意程序中指数和群运算符号
Ax=abs(x); %求出幅度，即复数模
Bx=angle(x); %求出相角，以 rad 为单位
Cx=real(x); %求出实部
Dx=imag(x); %求出虚部
subplot(2,2,1); %分成四张小图绘制，小图编号为 1，可参看软件的帮助信息
stem(Ax); % [ 1, 0.73, 0.54, 0.39, 0.29, 0.21, 0.15, ...]
ylabel('幅度');
subplot(2,2,3); %小图编号为 3 的图纸激活
stem(Bx); % [ 0, 0.52, 1.05, 1.57, 2.09, 2.62, 3.14, -2.62, -2.09, ...]rad
ylabel('相位');
subplot(2,2,2);
stem(Cx); %[ 1, 0.63, 0.27, 0.0, -0.14, -0.18, -0.15, -0.09, ...]
ylabel('实部');
subplot(2,2,4);
stem(Dx); %[ 0, 0.37, 0.46, 0.39, 0.25, 0.11, 0.0, -0.06, -0.07, ...]
```

复指数信号的两种图示方式如图 1.1.3 所示。

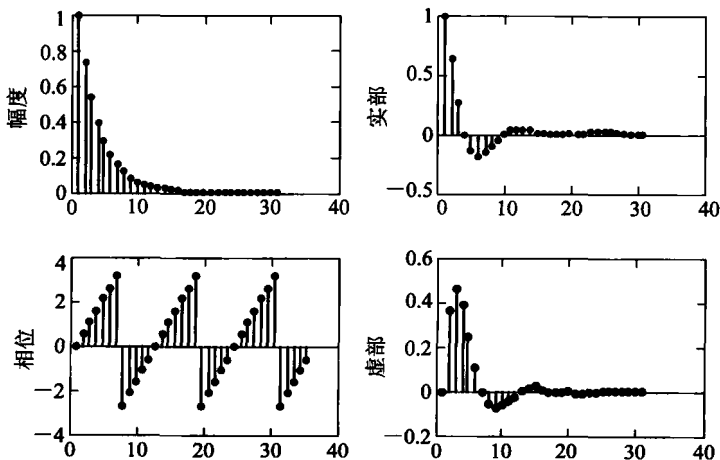


图 1.1.3 复指数信号的两种图示方式