高等学校“十二五”规划教材

电子信息与通信工程系列

数字信号处理

Digital Signal Processing

冀振元 主编

汝彦冬 单琳娜 陈义平 副主编

哈爾濱工業大學出版社

高等学校“十二五”规划教材

电子信息与通信工程系列

数字信号处理

Digital Signal Processing

冀振元 主 编

汝彦冬 单琳娜 陈义平 副主编

TN911.72
J207

哈尔滨工业大学出版社

内容简介

本书系统地介绍了数字信号处理基本理论、设计方法和实现等方面的内容。全书共分9章，第1章介绍数字信号处理的研究对象、学科概貌、系统基本组成、特点、发展及应用等内容；第2章介绍离散时间信号与系统的基本概念、卷积和的性质和计算、信号的频域表示、抽样定理等内容；第3章研究了Z变换、Z反变换以及相关内容；第4章和第5章对离散傅里叶变换及其快速算法进行了研究；第6章和第7章分别讨论了IIR数字滤波器和FIR数字滤波器的相关内容；第8章介绍了数字信号处理的MATLAB实现和DSP实现两方面的内容；第9章对数字信号处理的一些实际问题进行了讨论。

本书可作为通信、电子信息、自动化控制、计算机等专业本科生的必修课或选修课教材，也可作为相关专业技术人员在数字信号处理方面的理论基础参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/冀振元主编. —哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，2011.1

（电子信息与通信工程系列）

ISBN 978-7-5603-3095-2

Ⅰ.①数… Ⅱ.①冀… Ⅲ.①数字信号—信号处理 Ⅳ.①TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第222576号

责任编辑 许雅莹
封面设计 刘长友
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社　　址 哈尔滨市南岗区复华四道街10号　邮编150006
传　　真 0451—86414749
网　　址 http://hitpress.hit.edu.cn
印　　刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开　　本 787mm×1092mm　1/16　印张14.25　字数360千字
版　　次 2011年3月第1版　2011年3月第1次印刷
书　　号 ISBN 978—7—5603—3095—2
印　　数 1～3 000册
定　　价 29.00元

（如因印装质量问题影响阅读，我社负责调换）

总　序

电子信息与通信工程是当今世界发展最快的领域，该技术领域的新概念、新理论、新技术不断涌现，其知识更新速度也是令人吃惊。这就使得从事电子信息与通信工程技术的科技人员要不断学习，把握前沿动态，吸收最新知识。近年来，各高校通过教学改革，在引导学生将最新知识应用于社会实践，解决实际问题，培养学生实践动手能力、探索性学习能力和创新思维能力等方面取得了可喜成就。

为了培养国家和社会急需的电子信息与通信工程领域的高级科技人才，配合高等院校电子信息与通信工程专业的教学改革和教材建设，哈尔滨工业大学出版社组织哈尔滨工业大学、哈尔滨理工大学、齐齐哈尔大学、佳木斯大学、黑龙江科技学院等多所高校通过共同研讨和合作，相互取长补短，发挥各自的优势和特色，联合编写了这套面向普通高等院校“电子信息与通信工程系列”教材。

本系列教材的编写目标：结合新的专业规范，融合先进的教学思想、方法和手段，体现科学性、先进性和实用性，强调对学生实践能力的培养，以适应新世纪对通信、电子人才培养的需求。

本系列教材编写要求：专业基础课教材概念清晰、理论准确、深度合理、内容精炼，并注意与专业课教学的衔接；专业课教材覆盖面广、深度适中，体现相关领域的新发展和新成果，注重理论联系实际。

本系列教材的编委会阵容强大，编者都是教学工作第一线的骨干教师。他们具有多年丰富的教学和科研经历，掌握最新的理论知识，具有丰富的实践经验，是一支高水平的教材编写队伍。

本系列教材理论性与工程实践性紧密结合，旨在引导读者将电子信息与通信工程的理论、技术与应用有机结合，适合于高等学校电子、信息、通信和自动控制等专业使用。我深信：这套教材的出版，对推动电子信息与通信工程领域的教学改革、提高人才培养质量必将起到积极的推动作用，并以其内容的先进性、实用性和系统性为特色而获得成功。

吴群

哈尔滨工业大学教授

2010 年 4 月

前　言

FREFACE

数字信号处理是21世纪对科学和工程发展具有深远意义的一门技术，它的应用领域非常广泛，如通信、医学图像处理、雷达和声呐、地震、声学工程、石油勘探等。

全书共分9章：第1章数字信号处理概述，介绍了数字信号处理的研究对象、学科概貌、系统基本组成、特点、发展及应用等内容。第2章离散时间信号与系统，包括离散时间信号与系统的基本概念、卷积和的性质和计算、信号的频域表示、抽样定理等内容。第3章研究了Z变换Z反变换以及相关内容。第4章和第5章对离散傅里叶变换及其快速算法进行了研究。第6章和第7章分别讨论了IIR数字滤波器和FIR数字滤波器的相关内容。第8章介绍了数字信号处理的MATLAB实现和DSP实现两方面的内容。第9章对数字信号处理的一些实际问题进行了讨论，对学生正确理解所学知识有很大的帮助。

本书的先修课程是“信号与系统”、“工程数学”等，书中有些内容，如差分方程、Z变换等，可以根据学生已有的基础，进行适当地调整。本书可作为通信、电子信息、自动化控制、计算机等专业本科生的必修课或选修课教材，也可作为相关专业技术人员在数字信号处理方面的理论基础参考书。

本书第1章、第4章、第5章、第9章由冀振元编写，第2章由单琳娜编写，第3章由单琳娜和冀振元共同编写，第6章、第7章由汝彦冬编写，第8章由陈义平编写。全书由冀振元统稿。

本书编写过程中汲取了多本国内外优秀教材的精华，在这里向这些教材的作者表示感谢！

由于作者水平有限，且编写时间仓促，不足与不妥之处在所难免，望读者给予批评指正，不胜感激！

编　者

2011年1月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目 录

CONTENTS

第 1 章 数字信号处理概述 …… 1
1.1 数字信号处理的研究对象 …… 1
1.2 数字信号处理的基本过程 …… 1
1.3 数字信号处理的学科概貌 …… 2
1.4 数字信号处理的特点 …… 3
1.5 信号与系统的分类 …… 4
1.6 数字信号处理的发展及应用 …… 5
第 2 章 离散时间信号与系统 …… 7
2.1 引言 …… 7
2.2 离散时间信号的基本概念 …… 7
2.2.1 离散时间信号的定义 …… 7
2.2.2 离散时间信号的描述——序列 …… 8
2.2.3 几种常用的离散时间信号 …… 8
2.2.4 周期与非周期序列 …… 11
2.2.5 对称序列 …… 12
2.2.6 用单位冲激序列来表示任意序列 …… 13
2.3 序列的运算 …… 14
2.4 离散时间系统 …… 17
2.5 卷积和 …… 20
2.5.1 卷积和运算的性质 …… 21
2.5.2 求卷积和的方法 …… 22
2.6 离散时间系统的输入、输出描述法——线性常系数差分方程 …… 24
2.6.1 线性常系数差分方程 …… 24
2.6.2 线性常系数差分方程的求解 …… 24
2.7 离散时间信号和系统的频域表示 …… 27
2.8 序列傅里叶变换的主要性质 …… 28
2.9 连续时间信号的抽样 …… 32
2.9.1 抽样定理(采样定理) …… 32
2.9.2 信号的恢复 …… 34

习题 …… 35
第3章 Z变换 …… 38
3.1 Z变换 …… 38
3.1.1 定义 …… 38
3.1.2 Z变换的收敛域 …… 39
3.1.3 序列特性对收敛域的影响 …… 40
3.2 Z反(逆)变换 …… 42
3.2.1 围线积分法(留数法) …… 43
3.2.2 幂级数法(长除法) …… 44
3.2.3 部分分式展开法 …… 45
3.3 Z变换的基本性质和定理 …… 46
3.4 利用Z变换分析信号和系统的频域特性 …… 52
3.4.1 频率响应与系统函数 …… 52
3.4.2 差分方程的Z变换 …… 53
3.5 用系统函数的极点分布分析系统的因果性和稳定性 …… 54
3.6 用系统的零、极点分布分析系统的频率特性 …… 54
3.7 利用Z变换求解差分方程 …… 57
3.8 系统结构图与信号流图 …… 58
习题 …… 60
第4章 离散傅里叶变换 …… 62
4.1 傅里叶变换的几种形式 …… 62
4.2 周期序列的离散傅里叶级数 …… 64
4.2.1 离散傅里叶级数 …… 65
4.2.2 离散傅里叶级数的性质 …… 67
4.3 离散傅里叶变换 …… 71
4.4 Z变换的抽样 …… 72
4.4.1 离散傅里叶变换与Z变换的关系 …… 72
4.4.2 频域抽样定理 …… 74
4.5 离散傅里叶变换的性质 …… 77
4.6 用循环卷积计算序列的线性卷积 …… 84
习题 …… 91
第5章 快速傅里叶变换 …… 93
5.1 基2时域抽选FFT的基本原理 …… 93
5.1.1 DFT的运算量 …… 93
5.1.2 FFT算法原理 …… 94
5.1.3 FFT运算量 …… 99
5.2 基2时域抽选FFT的蝶形运算公式 …… 100
5.3 基2时域抽选FFT的其他形式 …… 103
5.4 基2频域抽选快速傅里叶变换 …… 104

5.4.1 基 2 频域抽选 FFT 的基本原理 …… 104
5.4.2 频域抽选法的蝶形运算公式 …… 107
5.5 逆离散傅里叶变换的快速算法 …… 108
习题 …… 110
第 6 章 无限长冲激响应(IIR)数字滤波器 …… 111
6.1 数字滤波器与数字滤波 …… 111
6.1.1 数字滤波器的特性 …… 111
6.1.2 数字滤波器的分类 …… 112
6.1.3 数字滤波器的设计方法和实现方法 …… 112
6.2 IIR 数字滤波器的网络结构 …… 113
6.2.1 网络结构 …… 113
6.2.2 采用信号流图表示网络结构 …… 113
6.2.3 IIR 数字滤波器的基本网络结构 …… 114
6.3 模拟滤波器的设计 …… 117
6.3.1 模拟滤波器的设计过程 …… 117
6.3.2 模拟滤波器设计指标 …… 117
6.3.3 巴特沃斯模拟低通滤波器的设计方法 …… 118
6.3.4 切比雪夫模拟滤波器的设计方法 …… 122
6.4 采用模拟滤波器设计 IIR 数字滤波器 …… 124
6.4.1 冲激响应不变法 …… 124
6.4.2 $H(j\omega)$ 与 $H_a(j\Omega)$ 的关系 …… 125
6.4.3 频率混叠现象 …… 125
6.4.4 双线性变换法 …… 126
6.5 数字高通、带通和带阻滤波器的原型变换设计法 …… 132
6.5.1 模拟低通滤波器变换成数字高通滤波器 …… 132
6.5.2 模拟低通滤波器变换成数字带通滤波器 …… 135
6.5.3 模拟低通滤波器变换成数字带阻滤波器 …… 137
6.6 直接设计法 …… 138
6.6.1 零、极点累试法(简单零、极点法) …… 138
6.6.2 时域直接设计法 …… 139
习题 …… 141
第 7 章 有限长冲激响应(FIR)数字滤波器 …… 143
7.1 FIR 数字滤波器的基本网络结构 …… 143
7.2 线性相位 FIR 数字滤波器的条件和特点 …… 147
7.3 利用窗函数法(窗口法)设计 FIR 数字滤波器 …… 152
7.3.1 窗函数 …… 152
7.3.2 窗函数法(窗口法)的设计步骤 …… 158
7.4 利用频率抽样法设计 FIR 数字滤波器 …… 159
7.5 IIR 和 FIR 数字滤波器的比较 …… 162

习题 …… 163
第 8 章 数字信号处理的 MATLAB 及 DSP 实现 …… 165
8.1 MATLAB7.0 语言简介 …… 165
8.1.1 MATLAB7.0 基本操作 …… 166
8.1.2 MATLAB7.0 基本语法 …… 168
8.1.3 基本绘图方法 …… 170
8.1.4 M 文件的调试 …… 172
8.2 数字信号处理中常用的 MATLAB 函数 …… 173
8.2.1 快速傅里叶变换函数 …… 173
8.2.2 卷积函数 …… 175
8.2.3 滤波函数 …… 176
8.2.4 IIR 数字滤波器设计函数 …… 177
8.2.5 FIR 数字滤波器设计函数 …… 178
8.3 MATLAB 程序设计实例 …… 178
8.3.1 IIR 数字滤波器设计实例 …… 178
8.3.2 FIR 数字滤波器设计实例 …… 182
8.4 数字信号处理的 DSP 实现 …… 185
8.4.1 CCS 集成开发环境简介 …… 185
8.4.2 用 CCS 开发简单的程序 …… 186
8.4.3 在 CCS 中读取数据和数据的图形显示 …… 187
8.4.4 代码执行时间分析(Profiler 的使用) …… 188
8.4.5 DSP 实现举例 …… 189
第 9 章 数字信号处理实际问题的讨论 …… 200
9.1 DFT 泄漏 …… 200
9.2 时域加窗 …… 206
9.3 频率分辨率及 DFT 参数的选择 …… 209
9.4 补零技术 …… 211
9.5 基于快速傅里叶变换的实际频率确定 …… 213
9.6 实际使用 FFT 的一些问题 …… 214
9.6.1 以足够高的速率抽样并采集足够长的信息 …… 214
9.6.2 在变换之前对数据进行整理 …… 215
9.6.3 改善 FFT 的结果 …… 215
9.6.4 解释 FFT 结果 …… 216
参考文献 …… 218

第 1 章

数字信号处理概述

1.1 数字信号处理的研究对象

数字信号处理的研究对象非常广泛，涉及很多的学科领域。在各学科理论研究和工程实现过程中，常常需要对信号进行分析、变换、综合等处理，以达到特征提取、信息增强、成分分析等目的。传统的模拟信号处理手段针对的是连续时间变量，其处理方式受到越来越多的局限。数字信号处理是把连续时间信号通过 A/D 变换转变成一系列用数字或符号表示的序列，利用通用计算机和专用数字信号处理设备处理这些序列，以达到所需要的目的。总之，凡是用数字方法对信号进行滤波、变换、增强、压缩、估计、识别等都是数字信号处理的研究对象，其应用领域极其广泛。

1.2 数字信号处理的基本过程

数字信号处理的基本过程如图 1.1 所示。

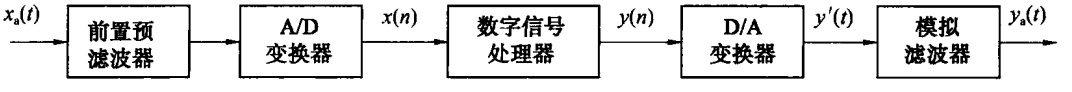

图 1.1 数字信号处理的基本过程

在实际应用过程中，我们常常接触到的是连续时间信号，或者说是模拟信号。如果想利用计算机等数字信号处理设备对该信号进行处理，必须通过模/数(A/D)转换过程。这一过程实际上就是对连续时间信号离散化的过程，需要确定合适的抽样(采样)频率，而待处理的连续时间信号往往包含多种频率成分，其中一部分是我们所关心的，而另一部分对于我们来说是干扰信号。

对于通过天线从空间收到的无线电信号而言，其频率覆盖范围是非常广泛的，虽然我们在设计接收天线时会考虑使有用信号频段的天线增益达到最大，同时抑制无用信号的能量，但是由于技术条件等限制，实际设计出的接收天线不可能达到将无用频段的信号完全屏蔽掉的目的。换句话说，通过接收天线进入系统的信号频带是非常宽的，其中包含大量的对我们来说是无用的信号，即干扰信号，而且不乏频率远高于我们感兴趣频段的信号。在对连续时间信号进行离散化的过程中，有一个非常重要的参数要进行合适的选择，那就是抽样频率。学过本书第 2 章的抽样定理后我们就会知道，为了保证抽样过程不丢失信息，或者说仍可以由抽样得到的

数字信号不失真地恢复出原来的模拟信号，要求抽样频率必须大于信号最高频率的两倍。

这样，如果不对 A/D 转换前的信号作任何预处理，按照抽样定理选择的抽样频率势必会远远大于有用信号最高频率的两倍，甚至永远选择不到合适的抽样频率。抽样频率过高不但对 A/D 转换芯片提出更高的要求，而且大量的数据存储和计算也给后续的数字信号处理平台带来很大的压力，关键是这并不会给有用信号的处理带来任何帮助。因此，我们需要在对模拟信号进行 A/D 转换前进行预处理，而图 1.1 中前置预滤波器的作用正是解决以上问题。通过合理的设计，使我们关心的信号正常通过，而其他频率成分则尽量抑制掉。

图 1.1 中的数字信号处理器是整个数字信号处理系统的核心，它可以是通用计算机，也可以是由专用数字信号处理芯片构成的高速数字信号处理平台，在这里实现对信号的滤波、变换、增强、压缩、估计、识别等处理工作。

图 1.1 的 D/A 变换器实现的功能与 A/D 变换器正好相反，如果根据任务需要，需将处理后的数字信号变成模拟信号，则需要 D/A 变换器来实现。而 D/A 转换后的信号会含有高频成分，D/A 变换器之后的模拟滤波器就是起到对其进行平滑的作用，因此又可称为平滑滤波器，通常采用模拟低通滤波器实现。图 1.1 中各过程的波形示意图如图 1.2 所示。

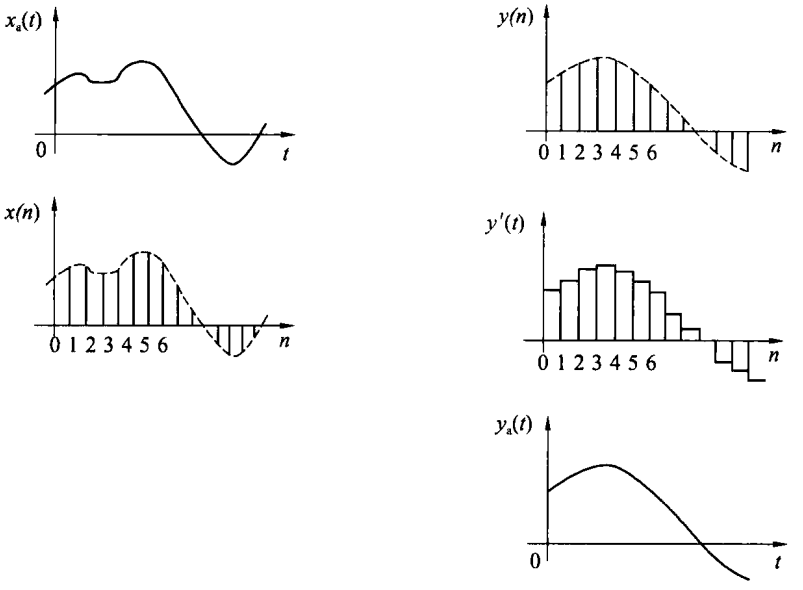

图 1.2 数字信号处理过程中的波形示意图

1.3 数字信号处理的学科概貌

数字信号处理领域的两大理论基础是离散线性移不变系统理论和离散傅里叶变换(DFT)，之所以这样说是因为：①我们讨论的系统是满足线性和移不变性的离散时间系统；②离散傅里叶变换是数字频谱分析的基本工具，以后很多新的处理手段大都是在 DFT 的基础上发展起来的。

数字信号处理有两个基本的学科分支，即数字滤波和数字频谱分析。具体地说，数字滤波部分包括无限长冲激响应(IIR)数字滤波器和有限长冲激响应(FIR)数字滤波器两部分内容。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

涉及它们的数学逼近问题、综合问题(选择滤波器结构和运算字长)以及具体的硬件或软件实现问题。

数字频谱分析则包括确定信号的频谱分析和随机信号的频谱分析两部分内容。对于确定信号的频谱分析,通常采用离散傅里叶变换的方法来进行,而随机信号的频谱分析就是统计的谱分析方法。

二维及多维信号处理则是数字信号处理新的发展领域,不断有新的技术涌现。

数字信号处理的学科概貌可用图 1.3 大致概括。

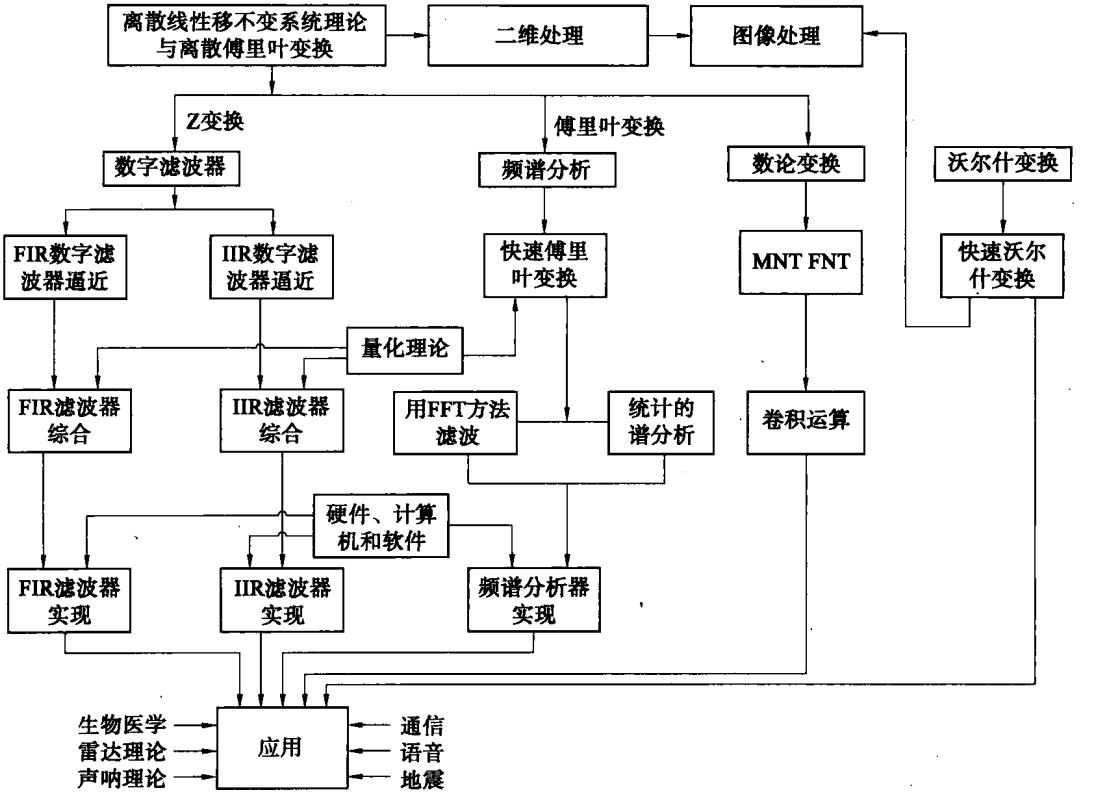

图 1.3　数字信号处理的学科概貌

1.4　数字信号处理的特点

相对于传统的模拟信号处理,数字信号处理系统具有以下优点。

1. 精度高

模拟系统的精度由元器件精度决定,模拟元件的精度很难达到 10^{-3} 以上,因此模拟系统的精度很难做到很高。而数字系统的精度由位数决定,只要 16 位字长就可接近 10^{-5} 的精度,想要达到更高的精度则可采用更高的位数,例如 32 位、64 位等。

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,只需改变存储的系数,就可得到不同的系统。而模拟系统则不具备这种特点,如想获得不同的系统,则必须

改变组成系统的元器件。

3. 可靠性强

数字系统只有“0”、“1”两个信号电平，且每种电平允许一定的变化范围。例如常用的TTL电平，用0 V表示“0”电平，用5 V表示“1”电平，同时允许一定的波动范围，即低于0.8 V就被认为是“0”电平，高于2.4 V就被认为是“1”电平。因此数字系统受外界环境温度以及噪声的影响较小，而模拟系统的各个元件都有一定的温度系数，且电平是连续变化的，易受温度、噪声、电磁感应等影响，可靠性远不如数字系统。

4. 容易大规模集成

由于数字器件有高度规范性、体积小等优点，因此便于组成大规模集成电路。而模拟元器件的体积和处理的频率有关，对于低频信号，所需模拟器件如电感、电容等的体积非常大，很难大规模集成。

5. 时分复用

数字系统可实现时分复用，如图1.4所示。

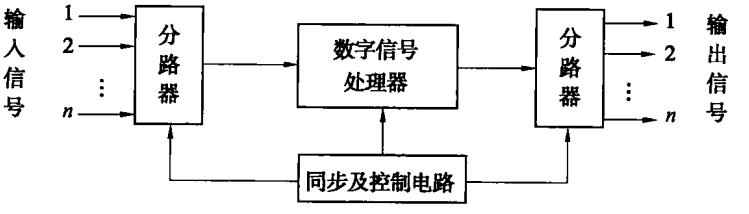

图1.4 时分复用数字信号处理系统示意图

利用数字信号处理器可同时处理几个通道的信号。原因是某一路信号的相邻两抽样值之间存在很大的空隙时间，因此对于高速数字信号处理器来说，可以利用这个时间空隙处理另一个通道的数字信号。对于某一固定数据率的数字信号而言，数字信号处理器的运算速度越高，通过时分复用能够处理的信号通道数越多。

6. 可获得高性能指标

当用频谱分析仪对信号进行频谱分析时，模拟频谱仪只能分析10 Hz以上频率，而数字频谱分析仪完全可以分析10^{-3} Hz；而且有限长冲激响应数字滤波器可实现准确的线性相位，这在模拟系统中是很难实现的，这一点对于有用信息在信号相位上时是非常重要的。

7. 二维与多维处理

利用数字信号处理系统很容易实现二维与多维信号处理任务，这在模拟系统中是很难实现的。

以上给出了数字信号处理系统的诸多显著优点，但是它也有一定的缺点。目前数字信号处理系统的主要缺点是速度不高，当处理的信号频率很高时数字系统不能完全取代模拟系统，必须采用模拟系统和数字系统相结合的方式来实现。

1.5 信号与系统的分类

携带信息的物理过程称为信号，在数学上表示成一个或几个独立变量的函数。根据信号

的自变量和函数值取连续值还是离散值，可将信号作以下分类：

①模拟信号：时间和幅度上都取连续值的信号；

②数字信号：时间和幅度上都取离散值的信号；

③连续时间信号：时间上取连续值的信号，幅度可以连续，也可离散。通常与模拟信号混同；

④离散时间信号：时间上取离散值，不考虑幅度是否离散的信号。

物理上把处理信号的装置或技术称为系统，相应的系统分类如下：

①模拟系统：输入输出均为模拟信号的系统；

②数字系统：输入输出均为数字信号的系统；

③连续时间系统：输入输出均为连续时间信号的系统；

④离散时间系统：输入输出均为离散时间信号的系统。

1.6　数字信号处理的发展及应用

数字信号处理的重大进展之一是 1965 年发表的快速傅里叶变换，它使数字信号处理从概念到实现发生了重大转折。20 世纪 60 年代初期，人们已经掌握了利用计算机进行谱分析的原理，但是所需要的时间太长，给实际应用带来了很大的困难。而快速傅里叶变换算法的出现使得原有的计算量缩小了一两个数量级，从而使数字信号处理技术得到广泛的应用。随后又出现了一些新的算法，如用数论变换进行卷积运算的方法、WFTA 算法、沃尔什变换(WHF)及其快速算法(FWHT)等。

数字信号处理发展过程中的另一个重大进展是有限长冲激响应(FIR)数字滤波器和无限长冲激响应(IIR)数字滤波器地位的相对变化。最初人们认为 IIR 数字滤波器比 FIR 数字滤波器优越，随着信息理论的发展，人们认识到除信号的幅度包含信息外，相位同样也包含着信息。而且相对于包含在幅度中的信息而言，包含在相位的信息不容易受到干扰，能更好地实现信息的无失真传递。为了得到更多的信息，往往需要同时提取包含在幅度和相位中的信息，这样就不允许在信号处理过程中有相位失真。在早期人们只看重信号的幅度信息时，IIR 数字滤波器可用较少的阶数达到与 FIR 数字滤波器相同的滤波效果，因此人们认为 IIR 数字滤波器更为优越。但是，IIR 数字滤波器不能保证相位不失真的要求，而 FIR 数字滤波器在满足一定的条件下可设计成具有严格线性相位的系统，因此为了提取相位信息人们往往宁可牺牲阶数也要采用 FIR 数字滤波器来处理信号。另外，有学者提出可以用快速傅里叶变换实现卷积运算，也就是说可以用快速傅里叶变换实现高阶的 FIR 滤波运算。因此，人们不再一味地认为 IIR 数字滤波器比 FIR 数字滤波器优越，而是根据具体应用场合适当地进行选择。随着研究的深入，人们越来越重视 FIR 数字滤波器的使用。

从数字信号处理技术的实现上看，大规模集成电路技术是推动数字信号处理技术发展的重要因素。由于大规模集成电路的出现，数字信号处理不仅可以在计算机上实现，而且出现了专用的数字信号处理(DSP)芯片及相应电路芯片，使得数字信号处理的速度有了更大的提高。

尽管 20 世纪 70 年代末就出现了一些具有 DSP 性质的处理器，如日本 NEC 的 μPD7720 等，但是公认的第一种商业上成功的 DSP 芯片是 1982 年美国德州仪器(TI)公司推出的第一代产品 TMS32010。TMS32010 采用了数据总线和程序总线分离的 Harvard 体系结构，并具

有内部硬件乘法器，完成一次乘法只要一个指令周期。Harvard 体系结构和硬件乘法器构成了第一代 DSP 区别于通用计算机的主要特点。如今 DSP 产品已经发展为一个庞大的家族，其体系结构也从早期简单的 Harvard 体系结构，发展到现在的 SHARC、VLIW 等复杂的体系结构；其运算速度从早期的 200 ns 指令周期发展到今天的 2～3 ns 指令周期。目前市场上的 DSP 产品主要有 TI 公司的 TMS320 系列，Motorola 公司的 DSP5600、DSP9600 系列，AT&T 公司的 DSP16、DSP32 系列及 AD 公司的 ADSP－21 系列等。

鉴于数字信号处理的突出优点，使得它的应用领域非常广泛。目前，数字信号处理已在生物医学工程、语音处理与识别、人工智能、雷达、声呐、遥感、通信、语音、图像处理等领域得到了广泛应用。

第 2 章

离散时间信号与系统

2.1 引 言

随着近代数字技术的发展，过去用连续时间系统实现的许多功能目前已经可以用离散时间系统来实现。离散时间系统所具有的精度高、可靠性好、便于制成大规模集成电路等一系列的优点是连续时间系统所无法比拟的。尤其是大规模集成电路和高速数字计算机的发展，极大地促进了离散时间信号(discrete time signal)与系统理论的进一步完善。人们用数字的方法对信号与系统进行分析与设计，不断提高数字处理技术。对大数据量的音频、视频等多媒体数字信息以更有效的方法、更理想的速率进行处理和传输。因此，研究离散时间信号与系统的基本理论和分析方法就显得尤为重要。

本章作为全书的基础，首先，通过阐述离散时间信号和离散时间系统的基本概念，开始研究数字信号处理，将集中解决有关信号表示、信号运算、系统分类和系统性质等问题；其次，对于线性移不变系统，将证明输入与输出是卷积和的关系，并讨论卷积和的性质及求卷积和的方法；然后，讨论线性常系数差分方程的解法；最后介绍模拟信号的数字化处理方法。

2.2 离散时间信号的基本概念

2.2.1 离散时间信号的定义

一个信号 $x(t)$，它可以代表一个实际的物理信号，也可以是一个数学函数。例如，$x(t)=A\sin(\Omega t)$ 既是正弦信号，也是正弦函数。因此，在信号处理中，信号与函数往往是通用的。$x(t)$ 所表示的可以是不同的物理信号，如温度、压力、流量等，但在实际应用中都要把它们转变成电信号，这一转变可以通过使用不同的传感器来实现，因此，我们可以简单地把 $x(t)$ 看做一个电压信号，或是电流信号。自变量 t 可以是时间，也可以是其他变量。若 t 代表距离，那么 $x(t)$ 是一个空间的信号；若 t 代表时间，则 $x(t)$ 为时间信号，或时域信号。在本书中，如没有特殊说明，我们都把 $x(t)$ 视为随时间变化的电信号。$x(t)$ 本身可以是实信号，也可以是复信号。物理信号一般都是实信号，建立在数学模型基础上的信号有可能是复信号。

若 t 是定义在时间轴上的连续变量，则称 $x(t)$ 为连续时间信号，又称模拟信号；若 t 仅在时间轴的离散点上取值，则称 $x(t)$ 为离散时间信号，这时应将 $x(t)$ 改写为 $x(nT_s)$，T_s 表示相邻两个点之间的时间间隔，又称抽样周期(sampling periodic)，n 取整数，即

$$x(nT_s) \quad (-\infty < n < +\infty)$$

一般，我们可以把 T_s 归一化为 1，这样 $x(nT_s)$ 可以简单记为 $x(n)$，即

$$x(n) = x(nT_s) \quad (-\infty < n < +\infty)$$

这样表示的 $x(n)$ 仅是整数 n 的函数，所以又称 $x(n)$ 为离散时间序列(discrete time series)。

$x(n)$ 在时间上是离散的，其幅度可以在某一个范围内连续取值。但目前的信号处理装置多是以计算机或专用信号处理芯片来实现的，都是以有限的位数来表示其幅度，因此，其幅度也必须“量化”，即取离散值。在时间和幅度上都取离散值的信号称为数字信号(digital signal)。目前，在信号处理的文献与教科书中，“离散时间信号”和“数字信号”这两个词是通用的，都是指数字信号，本书也是如此。

一个离散时间信号 $x(n)$，可能由信号源产生时就是离散的，例如，若 $x(n)$ 表示的是一年 365 天中每天的平均气温，那么 $x(n)$ 本身即是离散时间信号。但大部分情况下，$x(n)$ 是由连续时间信号 $x(t)$ 经抽样后所得到的，我们将在本章的最后一节学习这部分的内容。

2.2.2 离散时间信号的描述 —— 序列

无论本身就是时间上离散的离散时间信号，还是经过抽样后得到的离散时间信号，无非表示的就是一系列的数值，信号随 n 的变化规律可以用公式表示，也可以用图形表示，如图 2.1 所示。横轴虽为连续直线，但只有在 n 为整数时才有意义；纵轴线段的长短代表各序列值的大小。

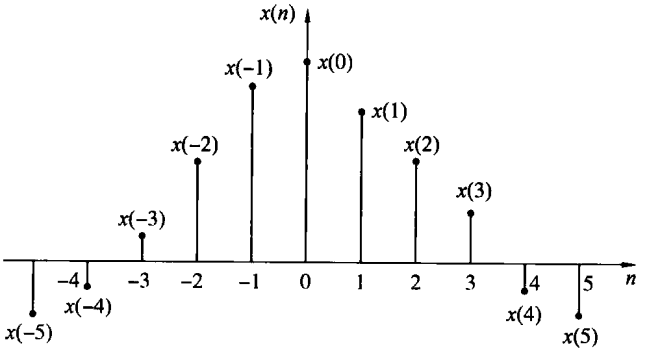

图 2.1 离散时间信号的图形表示

如果 $x(n)$ 是通过观测得到的一组离散数据，则其可以用集合的符号表示，例如

$$x(n) = \{\cdots 1, 2.5, -2, 1.5, -3 \cdots\}$$

2.2.3 几种常用的离散时间信号

1. 单位冲激(单位抽样)序列 $\delta(n)$

函数表示为

$$\delta(n) = \begin{cases} 1 & (n = 0) \\ 0 & (n \neq 0) \end{cases} \tag{2.1}$$

该信号在离散时间信号与离散时间系统的分析与综合中有着重要的作用，类似于 $\delta(t)$，但它们的定义不同。$\delta(t)$ 是建立在积分的定义上的，即

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com