

普通高等教育“十一五”规划教材

# 数字信号处理

吴瑛 张莉 张冬玲 李萍 编著

普通高等教育“十一五”规划教材

# 数字信号处理

吴 瑛 张 莉 编著  
张冬玲 李 萍  
那 彦 主审

西安电子科技大学出版社

2009

## 内 容 简 介

本书系统地讲述了数字信号处理的基本理论、算法及相应的实现方法。全书共分 10 章, 内容包括绪论、离散时间信号和系统的时域分析、离散时间信号和系统的频域分析、离散傅里叶变换、快速傅里叶变换、数字滤波器概论、FIR 数字滤波器、IIR 数字滤波器、数字滤波网络、数字信号处理应用举例。

本书配有大量的例题、习题和上机题, 典型例题给出了 Matlab 详细程序, 有助于读者自学。

本书可作为高等学校电子信息及其相近专业本科生教材, 也可作为相关专业科技人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/吴瑛等编著. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2009. 8

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2312 - 2

I. 数… II. 吴… 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(2009)第 119133 号

策 划 张 媛

责任编辑 张 梁 张 媛

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 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 20.75

字 数 487 千字

印 数 1~4000 册

定 价 29.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2312 - 2/TN · 0531

**XDUP 2604001-1**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

# 前 言

随着各种电子技术及计算机技术的飞速发展和各种超大规模集成电路的广泛使用，数字信号处理学科得到了飞跃式发展，成为通信、雷达、声纳、电声、电视、测控、生物医学工程等众多学科领域的重要理论基础。目前数字信号处理已成为高等院校电子信息类专业学生必修的一门专业基础课。为了适应数字信号处理在设计思想、算法、仿真与设计工具以及硬件结构等方面新理论与新技术的发展，满足教学要求，在参考国内外同类相关教材的基础上，我们结合长期从事数字信号处理方面教学和科研的工作经验，编写了本书。本书主要有以下特点：

1. 章节安排合理，逻辑性强，语言深入浅出。

本书紧扣数字信号处理的主要内容，着眼关键问题，深入浅出地介绍了数字信号处理的相关内容。首先，在内容的选择上既保持了课程的完整性，又兼顾了前后课程的衔接关系。例如，只给出了 $Z$ 变换性质及其反变换的结论，略去了前修课程已讲解过的详细推导证明过程；只详细介绍了信号的抽取、内插和数字上、下变频的理论，略去了软件无线电课程要讲解的采样率转换滤波器的高效实现方法。其次，在章节安排上强调前后的连续性、关联性。例如，为了加深读者对离散傅里叶变换物理意义的理解，在详细介绍了离散时间信号与系统的时域、频域分析方法和离散时间信号与模拟信号之间的时域、频域关系之后，通过多种傅里叶变换的比较引出离散傅里叶变换的定义和物理意义。另外，为了方便读者查阅，各种变换的性质和基本序列的变换结果均以表格的形式给出。

2. 突出基本概念、基本原理，重视基本分析方法。

本书着眼于数字信号处理的基本概念、基本原理和基本计算方法，力求系统地、深入浅出地对数字信号处理的这“三基”问题进行阐述。在讨论离散时间信号和系统的时域、频域特性，序列的离散傅里叶变换，信号的抽取和内插等问题时，以它们的基本原理和思想为重点，强调物理意义，突出主要性质，明确应用场合；在讨论傅里叶变换及其快速算法时，以算法理论为基础，重点强调了编程思想；在讨论数字滤波器的设计和实现时，重点介绍了基本设计原理、基本设计方法，给出了多种 Matlab 设计和分析实例，结合量化效应分析了滤波器各种网络实现结构的优缺点。

3. 将经典内容和最新发展相结合，强调理论联系实际，关注工程实现。

早期的数字信号处理教材，大多只讨论算法理论及其推导，较少涉及实现方法及相关的软/硬件技术，与实际应用有较大脱节。本书在介绍相关内容时，既强调其基础理论知识，又讨论其应用背景。例如，在讲解离散 LTI 系统的频率响应时，不仅给出了单载波通过该系统的输出形式，还在第 9 章中详细介绍了利用该特性如何解决阵列信号处理中多通道幅相不一致的校正问题；在讲解离散傅里叶变换的频谱分辨率问题时，通过实际频率估计例子来验证采样频率、DFT 点数与频率估计精度的关系；在介绍信号的抽取和内插时，不仅介绍了原理，给出了详细的推导，还根据实际芯片原理框图，给出了 Matlab 的仿真过

程和每一步的频谱图，并在第 9 章中详细介绍了数字上、下变频中常用的 CIC 滤波器和半带滤波器的原理和实现方法。

4. 与 Matlab 语言相结合，提高了形象教学的效果，便于工程技术人员分析和设计。

数字信号处理是一门理论与实践密切相结合的课程，为了加深对理论内容的理解，本书利用 Matlab 包含的各种库函数，对各章节的大部分基本原理和内容给予释疑与实现，并给出了 Matlab 编程实例，使得一些很难理解的抽象理论得以直观演示解释。例如在讲解最小相位系统的特性时，通过 Matlab 实例直观地演示了最小相位与最大相位系统的不同，加深了读者的感性认识；在讲解滤波器系数的量化效应时，用 Matlab 将 IIR 滤波器直接型和级联型的系数分别用不同的位数量化后，显示并比较其幅频响应，可以直观地观察到直接型和级联型对字长效应的敏感性。

5. 例题和习题针对性强、数量多，强化实践环节。

每一章节中的重点和难点均配有相应的例题，大部分例题给出了 Matlab 程序，供学生参考。各章末有大量的理论练习题和 Matlab 上机实验题。有些例题和习题是以应用中的实际问题为基础编写的。

本书共分 10 章。在绪论中，主要介绍了数字信号处理系统的基本组成、研究内容和实现方法，讨论了数字信号处理的优点。第 1 章是全书的理论基础，主要讨论了离散时间信号和系统的时域分析方法。重点介绍了离散时间信号的基本概念、表示方法、典型序列和周期序列，离散时间系统的线性时不变性质，线性时不变系统的单位脉冲响应，输入、输出之间的线性卷积关系，系统特性的线性常系数差分方程及其求解方法；还讨论了确定性离散时间信号的相关性。第 2 章讨论了离散时间信号和系统的频域分析方法。重点介绍了序列傅里叶变换的定义、物理意义和性质，序列傅里叶变换与序列 Z 变换的关系，离散时间线性时不变系统的系统函数、频率响应、零极点分布对系统特性的影响；还介绍了离散时间信号与模拟信号时域和频域的关系。第 3 章讨论了离散傅里叶变换(DFT)。从傅里叶变换的几种形式引入 DFT 的定义，论证了几种傅里叶变换之间的关系，介绍了 DFT 的性质；在讲解 DFT 的应用中，重点介绍了线性卷积和循环卷积的关系，有限长序列与无限长序列的快速卷积方法——重叠相加和重叠保留方法；详细地给出了用 DFT 对信号作频谱分析时可能遇到的问题及解决方法；还介绍了信号的整数倍抽取和内插的基本原理和频谱关系。第 4 章主要讨论离散傅里叶变换的快速算法。重点讨论了基 2 时分和基 2 频分快速傅里叶变换算法，画出了其蝶形流图；分析了算法的特点和运算量，并给出了编程思想和程序框图；还讨论了实序列的快速傅里叶变换算法和线性调频 Z 变换算法。第 5 章为数字滤波器概论，介绍了数字滤波器的定义、分类方法和设计指标；给出了几种特殊滤波器的定义和特性分析。第 6 章讨论了有限长脉冲响应(FIR)滤波器的设计方法，在给出了 FIR 滤波器线性相位的条件和特点的基础上，重点讨论了窗函数设计方法，介绍了频率采样设计方法和等波纹最佳逼近设计方法，给出了 Matlab 设计实例。第 7 章讨论了无限长脉冲响应(IIR)滤波器的设计方法。在给出各种归一化模拟低通滤波器模型的基础上，介绍了模拟滤波器的设计方法，重点讨论了 IIR 数字滤波器的设计方法——脉冲响应不变法和双线性变换法的基本原理、变换、映射关系和各自的特点，并给出了 Matlab 实例；比较了 IIR 和 FIR 数字滤波器的性能和各自的特点，并讨论了采样频率与数字滤波器的阶数关系。第 8 章讨论了数字滤波器的实现结构与误差分析。首先讨论了 IIR 数字滤波器的直接型、级

联型和并联型以及 FIR 数字滤波器的直接型、级联型和线性相位型的算法实现结构；然后讨论了信号量化、滤波器系数量化以及运算过程量化的有限字长效应问题。第 9 章讨论了数字信号处理的应用实例，给出了正交移相器的原理及实现方法；讨论了利用单载波测量 LTI 系统频率响应的原理及应用实例——阵列信号处理中的多通道幅相一致性校正；介绍了数字上、下变频芯片中常用的 CIC 滤波器和半带滤波器的原理及实现方法，给出了数字上、下变频的 Matlab 仿真实例，并简要介绍了常用数字上、下变频芯片的功能和参数设置。

本课程的先修课程是信号与系统、Matlab 语言等。本书教学参考学时为 60 学时。

本书第 2 章由李萍编写，第 3、9 章由张莉编写，第 5、6 章由张冬玲编写，吴瑛编写了其余章节，并对全书进行了最终校正、修改和增补。

在本书的编写过程中，我们参考了国内外相关的参考文献资料，在此向这些参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中难免有一些缺点，望读者不吝赐教。

作者联系电话：0371-81631296

E-mail: hnwuying22@163.com

编 者

2009 年 4 月

# 目 录

第 0 章 绪论 .....	1
0.1 数字信号处理概述 .....	1
0.2 数字信号处理的优点 .....	3
第 1 章 离散时间信号和系统的时域分析 .....	5
1.1 引言 .....	5
1.2 离散时间信号 .....	5
1.2.1 离散时间信号和数字信号 .....	5
1.2.2 序列的表示方法 .....	6
1.2.3 基本序列 .....	7
1.2.4 周期序列 .....	10
1.2.5 序列的运算 .....	12
1.2.6 序列的功率和能量 .....	14
1.3 离散时间系统 .....	15
1.3.1 离散时间线性时不变系统 .....	15
1.3.2 线性时不变系统的单位脉冲响应与线性卷积 .....	17
1.3.3 系统的因果性和稳定性 .....	20
1.3.4 线性常系数差分方程 .....	22
1.3.5 用 Matlab 求解线性常系数差分方程 .....	24
1.4 离散时间信号的相关性 .....	25
1.4.1 相关系数 .....	25
1.4.2 相关函数的定义 .....	26
1.4.3 相关函数与线性卷积的关系 .....	27
1.4.4 相关函数的性质 .....	28
1.4.5 相关函数的应用 .....	28
习题与上机题 .....	30
第 2 章 离散时间信号和系统的频域分析 .....	34
2.1 引言 .....	34
2.2 离散时间信号的傅里叶变换 .....	34
2.2.1 离散时间信号傅里叶变换的定义 .....	34
2.2.2 离散时间信号傅里叶变换的性质 .....	37
2.3 离散时间信号的 Z 变换 .....	42
2.3.1 离散时间信号 Z 变换的定义 .....	42
2.3.2 离散时间信号 Z 变换与 SFT 的关系 .....	43
2.3.3 Z 变换的收敛域与序列特性之间的关系 .....	44
2.3.4 逆 Z 变换 .....	45

2.3.5 Z变换的性质 .....	48
2.4 LTI离散时间系统的频域分析 .....	50
2.4.1 LTI离散时间系统的频率响应与系统函数 .....	50
2.4.2 系统函数的收敛域和极点分布与系统因果性和稳定性的关系 .....	52
2.4.3 系统函数的零极点分布对系统频率响应特性的影响 .....	53
2.4.4 利用Z变换求解系统的输出 .....	58
2.5 离散时间信号与模拟信号时域和频域的关系 .....	60
2.5.1 采样信号与模拟信号的关系 .....	60
2.5.2 离散时间信号与模拟信号的关系 .....	62
2.5.3 A/D及D/A转换 .....	64
习题与上机题 .....	66
<b>第3章 离散傅里叶变换(DFT)</b> .....	<b>70</b>
3.1 引言 .....	70
3.2 傅里叶变换的几种形式 .....	70
3.2.1 连续时间周期信号的傅里叶级数 .....	70
3.2.2 连续时间非周期信号的傅里叶变换 .....	71
3.2.3 离散时间非周期信号的序列傅里叶变换 .....	71
3.3 离散傅里叶级数变换(DFST) .....	72
3.3.1 周期序列的离散傅里叶级数变换 .....	72
3.3.2 周期序列的傅里叶变换表示式 .....	74
3.4 离散傅里叶变换的定义 .....	77
3.4.1 DFT的定义 .....	77
3.4.2 DFT与Z变换和SFT的关系 .....	78
3.4.3 DFT的隐含周期性 .....	79
3.5 离散傅里叶变换的主要性质 .....	79
3.5.1 线性性质 .....	79
3.5.2 循环移位性质 .....	80
3.5.3 循环卷积定理 .....	83
3.5.4 共轭对称性 .....	85
3.5.5 离散帕斯瓦尔定理 .....	89
3.6 频率域采样 .....	89
3.6.1 频率域采样定理 .....	90
3.6.2 内插公式 .....	92
3.7 离散傅里叶变换的应用 .....	94
3.7.1 用DFT计算线性卷积 .....	94
3.7.2 用DFT对信号进行频谱分析 .....	101
3.8 离散时间信号的抽取和内插 .....	111
3.8.1 离散时间信号的整数倍抽取 .....	111
3.8.2 离散时间信号的整数倍内插 .....	116
习题与上机题 .....	118
<b>第4章 快速傅里叶变换(FFT)</b> .....	<b>123</b>
4.1 引言 .....	123
4.2 提高DFT运算效率的基本途径 .....	123



4.3 基 2 时分 FFT 算法 .....	124
4.3.1 基 2 时分蝶式运算定理 .....	124
4.3.2 基 2 时分的蝶形流图与计算量分析 .....	126
4.3.3 基 2 时分 FFT 算法的运算规律及编程思想 .....	129
4.4 基 2 频分 FFT 算法 .....	133
4.4.1 基 2 频分蝶式运算定理 .....	133
4.4.2 基 2 频分的蝶形流图与计算量分析 .....	135
4.5 IDFT 的快速算法 .....	138
4.6 实序列 DFT 的有效计算方法 .....	138
4.7 线性调频 Z(Chirp-Z)变换算法 .....	140
4.7.1 Chirp-Z 变换的基本原理 .....	140
4.7.2 Chirp-Z 变换的实现步骤 .....	142
4.7.3 Chirp-Z 变换运算量的估算 .....	143
4.7.4 用 Matlab 计算 Chirp-Z 变换 .....	144
习题与上机题 .....	147
<b>第 5 章 数字滤波器概论</b> .....	<b>149</b>
5.1 引言 .....	149
5.2 数字滤波器的定义和分类 .....	149
5.2.1 数字滤波器的定义 .....	149
5.2.2 数字滤波器的分类 .....	150
5.3 实际滤波器的设计指标 .....	151
5.3.1 实际滤波器对理想滤波器的逼近 .....	151
5.3.2 实际滤波器的设计指标 .....	153
5.4 几种常见的特殊滤波器 .....	154
5.4.1 全通滤波器 .....	154
5.4.2 数字陷波器 .....	155
5.4.3 梳状滤波器 .....	158
5.4.4 最小相位滤波器 .....	159
习题与上机题 .....	161
<b>第 6 章 FIR 数字滤波器</b> .....	<b>164</b>
6.1 引言 .....	164
6.2 FIR 滤波器的线性相位特性 .....	164
6.2.1 FIR 滤波器的第一类线性相位 .....	165
6.2.2 FIR 滤波器的第二类线性相位 .....	168
6.2.3 线性相位 FIR 滤波器的零点特性 .....	169
6.3 用窗函数法设计 FIR 数字滤波器 .....	170
6.3.1 窗函数法设计 FIR 滤波器的基本方法 .....	170
6.3.2 常用窗函数的频谱特点及选择原则 .....	176
6.3.3 窗函数法设计 FIR 滤波器的 Matlab 实例 .....	184
6.4 用频率采样法设计 FIR 数字滤波器 .....	187
6.4.1 频率采样设计法的基本思想 .....	187
6.4.2 设计线性相位 FIR 滤波器时对 $H(k)$ 的约束条件 .....	188
6.4.3 频率采样设计法的误差分析及改进措施 .....	190

6.5 利用等波纹最佳逼近法设计 FIR 数字滤波器 .....	195
6.5.1 等波纹最佳逼近法的基本思想 .....	195
6.5.2 用 Matlab 实现等波纹最佳逼近法设计举例 .....	197
习题与上机题 .....	204
<b>第 7 章 IIR 数字滤波器</b> .....	207
7.1 引言 .....	207
7.2 归一化模拟低通滤波器的设计方法 .....	207
7.2.1 归一化模拟低通滤波器 .....	208
7.2.2 巴特沃思型归一化模拟低通滤波器的设计方法 .....	209
7.2.3 切比雪夫型归一化模拟低通滤波器的设计方法 .....	213
7.2.4 椭圆型归一化模拟低通滤波器的设计方法 .....	216
7.2.5 贝塞尔型归一化模拟低通滤波器设计方法 .....	217
7.2.6 几种归一化模拟低通滤波器设计方法比较 .....	218
7.3 实际模拟滤波器的设计 .....	219
7.3.1 实际模拟滤波器的设计方法 .....	220
7.3.2 用 Matlab 设计模拟滤波器 .....	225
7.4 IIR 数字滤波器设计 .....	229
7.4.1 用脉冲响应不变法设计 IIR 数字滤波器 .....	229
7.4.2 用双线性变换法设计 IIR 数字滤波器 .....	235
7.4.3 数字滤波器的频率变换 .....	242
7.4.4 用 Matlab 设计 IIR 数字滤波器 .....	245
7.5 FIR 数字滤波器与 IIR 数字滤波器的比较 .....	248
7.6 数字滤波器采样频率与滤波器阶数的关系 .....	250
习题与上机题 .....	251
<b>第 8 章 数字滤波网络</b> .....	256
8.1 引言 .....	256
8.2 信号流图 .....	257
8.3 IIR 系统的基本网络结构 .....	258
8.3.1 IIR 直接型网络结构 .....	258
8.3.2 IIR 级联型网络结构 .....	260
8.3.3 IIR 并联型网络结构 .....	262
8.4 FIR 系统的基本网络结构 .....	263
8.4.1 FIR 直接型网络结构 .....	264
8.4.2 FIR 级联型网络结构 .....	264
8.4.3 FIR 线性相位型网络结构 .....	264
8.4.4 FIR 频率采样型网络结构 .....	266
8.4.5 FIR 快速卷积方法 .....	268
8.5 利用 Matlab 依据算法结构实现数字滤波器 .....	269
8.6 数字信号处理的误差分析 .....	271
8.6.1 数的表示方式及量化误差 .....	271
8.6.2 A/D 转换中的量化效应 .....	275
8.6.3 量化噪声通过线性系统的响应 .....	278
8.6.4 数字系统中的系数量化效应 .....	280

8.6.5 数字系统运算中的量化效应 .....	284
习题与上机题 .....	289
<b>第9章 数字信号处理应用举例</b> .....	<b>293</b>
9.1 引言 .....	293
9.2 正交移相器设计及实现 .....	293
9.2.1 离散时间信号的正交移相器 .....	293
9.2.2 离散时间信号正交移相器的实现 .....	295
9.3 以单频正弦信号为激励测量系统的频率响应 .....	297
9.3.1 实 LTI 系统频率响应的测量 .....	297
9.3.2 阵列信号处理中的多通道幅相一致性校正 .....	300
9.4 数字上、下变频器 .....	304
9.4.1 数字上、下变频原理的 Matlab 仿真 .....	305
9.4.2 CIC 滤波器 .....	309
9.4.3 HB 滤波器 .....	313
9.4.4 典型数字上、下变频芯片功能介绍及参数设置 .....	315
<b>附录 C 语言逆序及 FFT 子程序参考清单</b> .....	<b>318</b>
<b>参考文献</b> .....	<b>320</b>

## 第 0 章 绪 论

随着各种电子技术和计算机技术的飞速发展以及各种超大规模集成电路的广泛使用,数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)得到了飞跃式的发展,成为通信、计算机、雷达、声纳、电声、电视、测控、生物医学工程等众多学科和领域的重要理论基础。目前,数字信号处理已成为高等院校电子信息类专业的一门专业基础课。

信号作为信息的载体,几乎涉及所有的工程技术领域。信号处理就是研究如何对这些信号进行分析、变换、综合、估计和识别处理,以达到提取信号的有用分量,抑制或消除不需要的干扰分量,估计信号的特征参数,识别信号的种类等目的。

### 0.1 数字信号处理概述

#### 1. 数字信号处理的定义

数字信号处理是研究如何用数字或符号序列来表示信号以及对这些序列做处理的一门学科,即对含有信息的信号进行处理,以提取人们所希望得到的信息。

#### 2. 数字信号处理系统的组成

数字信号处理系统是多种多样的,但对于一般系统,其组成框图如图 0.1.1 所示。模拟信号通过前置预滤波器滤除高频成分,输出  $x_a(t)$ 。随后在模/数(A/D)转换器的取样器中每隔时间  $T$ (取样周期)取出一次当前输入信号的幅度,按照量化电平,将信号转换成二进制数,得到数字信号  $x(n)$ 。 $x(n)$ 通过数字信号处理器,得到输出的数字信号  $y(n)$ 。 $y(n)$ 通过数/模(D/A)转换器变成模拟信号  $y(t)$ ,最后通过一个模拟低通滤波器,滤除不需要的高频成分,平滑成所需的模拟信号  $y_a(t)$ 。

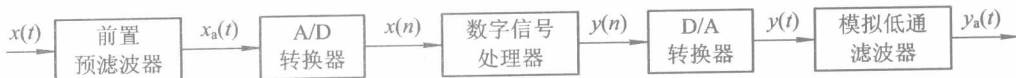


图 0.1.1 数字信号处理系统组成框图

各部分的输出波形如图 0.1.2 所示。

实际数字信号处理系统并不一定要包括图 0.1.1 中所示的所有框图,如系统只需要数字输出,则可以直接以数字形式显示或打印,就不需要 D/A 变换器和输出滤波;如系统输入为数字量,就不需要 A/D 变换器;如系统的输入、输出均是数字量,则只需要数字处理器这一核心部分即可。

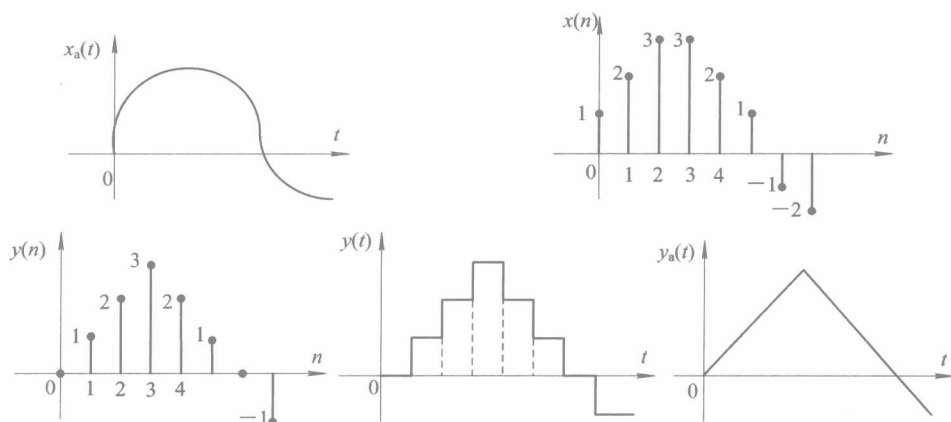


图 0.1.2 数字信号处理系统各部分的输出波形

### 3. 数字信号处理的基本内容

数字信号处理主要涵盖以下几个方面的内容：

- (1) 信号的采集：A/D 转换、采样定理、多速率信号处理、量化误差分析、非等间隔采样等。
- (2) 离散时间信号分析：时域及频域的分析、各种变换技术、信号特征的描述等。
- (3) 离散时间线性时不变(LTI, Linear Time-Invariant)系统描述：因果稳定、系统单位脉冲响应  $h(n)$ ，系统函数  $H(z)$ ，系统频率响应  $H(e^{j\omega})$  等。
- (4) 信号处理中的快速算法及其实现：FFT、卷积与相关等。
- (5) 滤波技术：IIR(无限脉冲响应)、FIR(有限脉冲响应)数字滤波器的设计及实现。
- (6) 信号处理中的特殊算法：信号的抽取、插值，反卷积，基于幅度谱和相位谱的信号重构技术等。
- (7) 信号的估值：各种估值理论、相关函数与功率谱估计等。
- (8) 信号的建模：最常用的有 AR(自回归)、MA(移动平均)、ARMA(自回归—移动平均)等模型。
- (9) 通信信号处理：信号的设计、信道检测与估计、信道均衡、OFDM(正交频分复用)、MIMO(多输入多输出)、数字复用与分集技术、智能天线等。
- (10) 非线性信号处理：盲信号处理、神经网络、RLS(递归最小平方)算法、LMS(最小均方)算法等。
- (11) 信号处理技术的实现及应用。

数字信号处理的理论、算法和实现方法之间是密不可分的。将一个好的信号处理理论应用于工程实现，需要相应的算法，以便使信号处理高速高效，并使实现系统简单易行。

本书作为专业基础课程的教材，主要涉及以上(1)~(6)的内容，其余部分属于现代信号处理内容。

### 4. 数字信号处理的实现方法

数字信号处理的最终目的是能够将研究成熟的算法应用于实际当中。算法的实现通常有两种，即软件实现和硬件实现，它们各自有着不同的应用环境。

软件实现主要是指在通用计算机上调用一些通用的软件包或者自己编程来实现某些数字信号处理算法。软件实现方式速度慢,一般不能做到实时处理,因此主要应用于教学、科学研究和一些非实时处理场合。目前,有关信号处理的典型软件工具是 Matlab 相关软件包,其中与数字信号处理有关的工具箱有 Signal Processing Toolbox(信号处理工具箱)、Filter Design Toolbox(滤波器设计工具箱)、Wavelet Toolbox(小波工具箱)、Image Processing Toolbox(图像处理工具箱)、High-Order Spectral Analysis Toolbox(高阶谱分析工具箱)和 Communication Toolbox(通信工具箱)等。

Matlab 提供了一个强大的数值计算环境和数据可视化软件平台,绝大多数数字信号处理算法都可以很方便地在该环境下得到理论验证和仿真。

数字信号处理的另一种实现方法则是基于特定的硬件,如 DSP 芯片、可现场编程门阵列 FPGA 等。硬件实现的特点是速度快、专用性强,一般能够实时处理。目前市场上的 DSP 芯片以 TI 和 ADI 两大公司的产品为主。ADI 公司 2004 年最新推出 Tiger SHARC 系列的 TS201,其主频达到了 600 MHz,处理能力为 3.6 GFLOPS(每秒  $10^9$  次浮点运算),是当前处理能力最强的浮点 DSP 芯片之一。TI 公司 2004 年初推出的 C64 系列的 TMS320C6416 是目前少数主频能突破 1 GHz 的 DSP 芯片之一,其定点处理能力达到了 8000 MIPS。

表 0.1.1 中通过典型的技术指标,比较了目前两大公司浮点 DSP 芯片的技术性能和发展趋势。从表中可以得出以下结论:

(1) ADI 的 DSP 芯片具有出色的浮点处理能力,由于内部存储空间大并且有内部总线仲裁,因此具有独特的多 DSP 互连能力(总线直接互连和 Link 口互连),使它们被称为“多 DSP 系统的实现标准”。该公司的浮点芯片多用于雷达、声纳和阵列等信号处理系统。

(2) TI 公司的 DSP 芯片则更注重单片的处理能力,在民用高端市场占有很大份额。

(3) DSP 芯片的发展趋势是向速度更快、集成度更高的方向发展。

表 0.1.1 ADI 和 TI 公司浮点 DSP 的技术指标比较

	ADSP2106X	TMS320C4X	ADSP21160	TMS320C6701	Tiger SHARC 201
生产日期	1995 年	1991 年	1999 年	1998 年	2004 年上市
运算速度	120 MFLOPS	80 MFLOPS	600 MFLOPS	1 GFLOPS	3.6 GFLOPS
内存	4 Mb	2K×32b	4 Mb	1 Mb	24 Mb
主频	40 MHz(25 ns)	80 MHz(12.5 ns)	100 MHz	167 MHz	600 MHz(1.67 ns)
1024 点 复数 FFT	0.46 ms	1.3 ms	96 $\mu$ s	120 $\mu$ s	15.7 $\mu$ s

注: MFLOPS 表示每秒  $10^6$  次浮点运算。

## 0.2 数字信号处理的优点

数字信号处理采用数字系统完成信号处理的任任务,它具有数字系统的一些共同优点,例如抗干扰、可靠性强、便于大规模集成等。除此之外,与传统的模拟信号处理方法相比

较，数字信号处理还具有以下明显的优点：

(1) 精度高。在模拟系统中，系统的精度是由元器件决定的，模拟元器件的精度很难达到  $10^{-3}$  以上。而在数字系统中，计算精度可以随运算位数的增加而得到显著的改善，例如 17 位字长就可达  $10^{-5}$  精度。所以在高精度系统中，有时只能采用数字系统。

(2) 可靠性高。模拟系统中各元器件都有一定的温度系数，易受环境条件，如温度、振动、电磁感应等影响，产生杂散效应甚至振荡等。而数字系统只有两个信号电平 0、1，受噪声及环境条件等影响小，且数字系统采用大规模集成电路，其故障率远远小于采用众多分立元器件构成的模拟系统。

(3) 灵活性大。数字系统的性能主要取决于各乘法器的系数，而这些系数存放于系数存储器内，只需对这些存储器输入不同的数据，就可以改变系统参数从而得到不同性能的系统。另外，数字系统可以时分复用，即用一套数字系统可以分时处理多路信号。如图 0.2.1 所示，由于信号的相邻两采样点之间存在着时间空隙，因而在同步器的控制下，系统对各路信号分别进行处理，最后通过分路器将输出序列分离输出。显而易见，系统运算速度越高，能处理的信道数目也就越多。

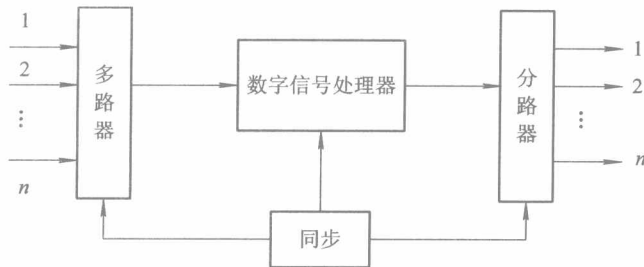


图 0.2.1 时分复用的数字信号处理系统

(4) 可以实现模拟系统无法实现的复杂处理功能。模拟系统只能对信号进行一些简单的处理，例如放大、滤波以及经典的调制与解调等。而数字系统则可以实现诸如解卷积、严格的线性相位、复杂的数学运算、信号的任意存取等各种复杂的处理与变换，如电视系统中的多画面、各种特技效果、特殊的音响和配音效果等。

(5) 易于大规模集成。由于数字系统对电路参数的要求不严，故产品成品率高。另外，组成系统的基本单元和基本模块具有高度的一致性和规范性，便于大规模集成、生产，从而使数字系统体积小、重量轻、性能价格比高。

(6) 便于加、解密。目前信息安全要求越来越高，加、解密算法越来越复杂，而只有数字处理才可以实现复杂的加、解密算法。

数字信号处理系统虽然有很多优点，但它也有局限性，如受采样频率必须满足奈奎斯特准则的限制，数字系统还不能实时处理频率很高的信号。但是，随着大规模集成电路和高速微处理器的发展，数字系统的速度越来越高，数字信号处理也会越来越显示出其优越性。

由于数字信号处理的基本理论和方法涉及微积分、随机过程、高等代数、复变函数和各种变换等数学工具以及信号与系统等专业基础知识，而本书作为数字信号处理的基础教材，不可能对上述各方面的内容予以全面论述，因此只能讨论数字信号处理的基本原理和基本分析方法，以作为今后学习专业知识和技术的基础。

# 第1章 离散时间信号和系统的时域分析

## 1.1 引言

信号是信息的物理表现形式，而信息则是信号的具体内容。一个信号可以定义为一个或多个独立变量的函数。信号的独立变量可以是连续的，也可以是离散的，信号的幅度同样可以是连续的或离散的。因此，在信号处理中涉及模拟信号、离散时间信号和数字信号，与之对应的有模拟系统、离散时间系统和数字系统。

本章是全书的理论基础，主要介绍离散时间信号的基本概念、表示方法、典型序列和周期序列，线性时不变系统的时域分析和线性常系数差分方程的求解方法，最后讨论了确定性离散时间信号的相关性。

## 1.2 离散时间信号

### 1.2.1 离散时间信号和数字信号

#### 1. 信号的定义

信号是信息的载体，它承载和传递着存在于自然界的各种纷繁复杂的信息。根据信号本身的特点，它常可以由一个或多个独立变量来描述，在数学上则可以表示成这些变量的不同函数。例如，语音信号在数学上可表示成时间  $t$  的函数，而图像信号又可以表示成一个二元或多元空间变量的亮度函数。

#### 2. 信号的分类

信号是多种多样的，可以按多种方法对信号进行分类。下面介绍几种主要的信号分类方法。

##### 1) 确定性信号和随机信号

任何可以被一个显式数学表达式、一个数据表或一个规定好的规则所唯一描述的信号，称为确定性信号。如  $\sin(\Omega_0 t)$ ，此类信号的过去、现在和将来的所有取值都可以准确知道，不存在任何不确定性。

在实际应用中，有些信号并不能被数学公式显式表达，在给定的时间、空间或某个参量上的取值是随机未知的，此类信号称为随机信号，如高斯白噪声。



## 2) 一维信号和多维信号

只随某一个参量的变化而变化的信号为一维信号,如仅随时间变化的电压、电流及语音信号等。随两个或两个以上参量的变化而变化的信号为多维信号,如灰度值随坐标  $x$  和  $y$  变化而变化的各种静止图像为二维信号。

## 3) 连续时间信号、离散时间信号和数字信号

时间为连续变量,幅值为连续或离散数值的信号称为连续时间信号,连续时间信号与模拟信号常常通用,如  $x_a(t) = \sin(\Omega_0 t)$  即为连续时间信号。

时间为离散变量,幅值为在一个有限或无限范围内取所有可能值的信号称为离散时间信号,例如  $x(n) = \sin(0.0104\pi n)$ ,如图 1.2.1(a)所示。

时间为离散变量,幅值只在可能取值的有限集上取值的信号称为数字信号,如图 1.2.1(b)所示,即经 A/D 采样之后的信号为数字信号。因此数字信号是对离散时间信号的幅度进行有限位的二进制编码、量化形成的。二进制编码位数越多,数字信号越接近离散时间信号。由于现在计算机的精度很高,位数一般在 32 位或 64 位,因此用软件处理数字信号时,可以不考虑这种误差的影响。但如果用硬件实现,尤其是定点 DSP 时,位数不可能很高,必须考虑误差的影响(详见第 8 章)。为讨论方便,以下涉及的信号均为离散时间信号。

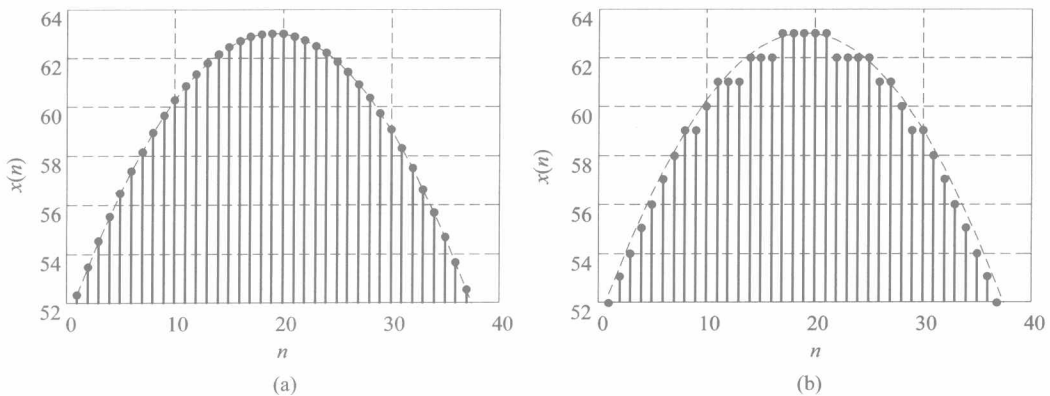


图 1.2.1 离散时间信号与数字信号

(a) 离散时间信号; (b) 数字信号

## 1.2.2 序列的表示方法

离散时间信号的来源一般有两类,在通信中最常见的一类是由模拟信号通过采样得到的,如模拟信号为  $x_a(t)$ ,采样频率为  $F_s$ ,采样间隔为  $T=1/F_s$ ,则离散时间信号可以用下式表示( $n$ 取整数, $n$ 为非整数时无定义):

$$x(n) = x_a(t) \big|_{t=nT} = x(nT), \quad -\infty < n < \infty \quad (1.2.1)$$

另外一类离散时间信号是通过测试记录得到的,例如一天温度的记录,每隔 1 小时记录一次,则早 5 点到早 10 点的温度可用  $x(n)$  表示:

$$x(n) = \{12, 13.2, 17.4, 20, 21.2, 23.3\}_{[5,10]}, \quad n = \{5, 6, 7, 8, 9, 10\}$$

不管离散时间信号来源如何,该信号均是由一组有序的数据序列组成的,因此离散时间信号又称做序列。