

# 数字信号处理

—— 理论、算法与实现

胡广书 编著



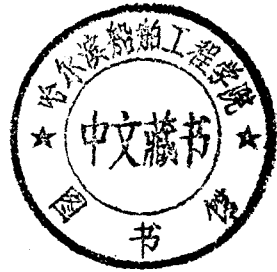
清华大学出版社

402590

# 数字信号处理

——理论、算法与实现

胡广书 编著



清华大学出版社

(京)新登字 158 号

## 内 容 简 介

本书较为系统地介绍了数字信号处理的理论、相应的算法及这些算法的软件与硬件实现。全书共 14 章,内容包括离散时间信号与离散时间系统的基本概念、Z 变换及离散时间系统分析、离散时间信号的傅里叶变换及 DFT、其它常用的信号变换(DCT、DST、DWT 及 Hilbert 变换)、傅里叶变换的快速算法、离散时间系统的相位、结构与状态变量描述、数字滤波器设计(IIR、FIR 及特殊形式的滤波器)、平稳随机信号的基本概念、经典功率谱估计、参数模型功率谱估计、非平稳信号的时-频分布及数字信号处理的硬件实现等内容。

本书阐述了基础理论与概念,同时尽量反映数字信号处理在近 20 年来的新进展,在叙述方法上,努力做到说理详细、论证清楚及便于自学。本书绝大部分章节都配有例题、习题及上机练习题,所附的 40 个子程序不但有利于读者学习书中的内容,而且也有利于将所学的内容用于实际。

本书可作为理工科研究生及大学本科高年级学生的教材及参考书,也可作为工程技术人员的自学参考书。

DEZ 2015

### 图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理:理论、算法与实现/胡广书编著. —北京:清华大学出版社,1997

ISBN 7-302-02498-7

I. 数… II. 胡… III. 数字信号-信号处理 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 07599 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

印刷者:北京丰台丰华印刷厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本:787×1092 1/16 印张:31.75 字数:749 千字

版 次:1997 年 8 月第 1 版 1997 年 8 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-02498-7/TN·73

印 数:0001—4000

定 价:29.00 元

# 前 言

本书是在宗孔德教授与本人合著的《数字信号处理》一书的基础上重新编著而成的。

《数字信号处理》一书于1988年由清华大学出版社出版后,已发行19000千册,并于1991年由台湾儒林图书有限公司在台湾出版发行。随着数字信号处理这一新学科的飞速发展及教学的需要,我们决定将原书修订为两本,一本是供研究生教学使用的教材,另一本是供本科生教学使用的教材。前者篇幅较大,希望尽可能多的包含信号处理的新内容、新进展,后者篇幅稍小,偏重于基本要求。宗孔德教授提议再版后的这两本著作由我们两人分别完成。并决定前者由我编写,后者由他来完成。现在奉献给读者面前的这本书即是笔者在宗孔德教授的鼓励与支持之下完成的。

本书共有14章,大致可以分为五个部分。第1至第4章为第一部分,它包括了离散信号和离散系统分析的基本理论,是学习和应用数字信号处理的基础篇。第4章介绍了近20年来提出的其它形式的变换技术,它们在信号处理中的地位越来越重要。特别是离散余弦变换,由于其良好的性质已被人们广为研究与应用。

第5章是本书的第二部分,该章篇幅较大,包含了近30年来所提出的有关DFT及卷积计算的主要方法。除了经典的Cooley-Tukey算法之外,还介绍了被公认为较好的分裂基算法,输入、输出点数不相同的DFT快速算法(Pruning, CZT)。最后简要介绍了Winograd快速算法的主要思路及快速余弦变换等。

第6至第9章是本书的第三部分。这一部分主要讨论离散系统的分析与综合问题。在第6章,首先讨论了离散时间系统的相位问题,简要介绍了全通系统及最小相位系统的基本定义与性质;讨论了在语音分析与谱估计中应用很广的Lattice结构;作为系统分析的一个重要工具——状态变量法,也在此处给以介绍。读者可以看到,这一章的大部分内容是第2章内容的延续。第7章从便于计算机编程的角度来讨论IIR滤波器的设计问题,力求避开繁琐的频率变换问题,以便于理解和应用。第8章为FIR滤波器的设计问题,也是从便于编程和应用的角度来讨论。第9章介绍一些具有特殊形式或特殊要求的滤波器,主要是三种不同形式的简单整系数滤波器,差分器及抽样率转换滤波器,后者实际上是多抽样率信号处理问题。

第10至第13章是本书的第四部分。第10章主要讨论了平稳随机信号的定义、性质、描述及通过线性系统的行为。第11章主要讨论经典功率谱估计问题,包括了自相关函数的估计,谱估计的周期图法与自相关法,讨论了估计的性能及改进方法。第12章讨论了现代谱估计的主要内容,即参数模型法,包括了AR,MA及ARMA模型,同时也简要介绍了非参数模型法,如最小方差方法,基于特征值分解的谱估计方法。第12章及第13章的时-频分布都是近20年来信号处理学科中最为活跃的内容。

最后一章,即第14章是本书的第五部分。简要介绍了信号处理中的硬件实现问题。

本书内容主要侧重于阐述信号处理中的基础理论,介绍为实现这些理论所提出的种种行之有效的算法,讨论把这些理论与算法用于工程实际时的软件与硬件实现。

本书没有列出专门的章节来讨论信号处理的应用问题,而是把这方面的内容分散于书中的例题里,相信读者在掌握了信号处理的基本理论后,不难把它们应用于自己所从事的学科领域。

本书也没有涉及数字信号处理中的有限字长问题(即量化误差和舍入误差)。其原因一方面是由于高精度 A/D 转换器的商品化使量化误差大大减小;另一方面是对大多数读者来说,往往并不需要过多地考虑由此引起的误差。为此,本书略去了这方面的内容。

本书的特点是:

- (1) 对信号处理的基础理论与主要算法给予了充分的讨论,论证和推导都较为详尽;
- (2) 尽量反映信号处理这一学科的新成果及目前的前沿内容;
- (3) 除最后两章外,本书前 12 章均附有习题与上机练习,并给出了为完成上机练习所需的约 40 个子程序。这些习题与上机练习将加深读者对信号处理理论的理解并达到学以致用目的。

尽管作者编写此书的初衷是使之面向研究生教学,但考虑到一本著作出版后将面向社会各个阶层的读者,因此作者在编写此书的过程中努力使之服务于更多的读者。

由以上三个特点可以看出,本书不但适用于研究生和高年级本科生的教学,同样也适用于研究人员及工程技术人员的自学。

本书作为清华大学研究生的讲义,已试用过两届。就作者的经验,讲授完全书的内容约需 80~90 学时。考虑到目前我国高校一学期课内约为 64 个学时,因此可选择其中的 2/3 作为课堂教学的内容,余下的部分作为自学或信号处理提高课的内容。

本书的先修课程是“信号与系统”,并需要一些概率论与随机过程的基础知识。鉴于听课对象并不一定先修过“信号与系统”,为此,建议在使用本教材时可按如下顺序组织教学(本建议仅供参考):

• 对没有学习过“信号与系统”的本科生和研究生:

第 1~3 章,第 5.1~5.6 节,第 6~8 章,第 10~11 章,第 12.1~12.6 节,第 14 章。

• 对已学习过“信号与系统”的本科生和研究生:

第 1、2 章作总结性复习,第 3~4 章,第 5.1~5.6 节,5.8 节,第 6~8 章,第 9 章选讲,第 10~12 章,第 14 章。

宗孔德教授与本人所承担的清华大学研究生公共课“数字信号处理”多年来得到清华大学研究生院的关心及多方面的支持,本书的出版又得到校研究生院的资助。在此,对清华大学研究生院的领导及工作人员表示衷心的感谢!

本人在从事该课程的教学的十余年中,始终得到了宗孔德教授的热情帮助,他对本书的选材、章节安排都提出了宝贵的意见,并对全书仔细审阅,指出了许多不适之处。杨福生教授在百忙之中审阅了本书的绝大部分章节,提出了很多精辟的见解和指导性的意见。周礼泉教授也对此书的编写给予了热情的关心和支持。在此书出版之际,谨向三位教授致以最衷心的感谢!

在本书编写过程中,系、教研室领导及同事给予关心与支持,听课的研究生提了许多

建议;劳长安同志为本书的绘图、计算机程序的编写与整理做了大量的工作;汪学愚、李义翔同志为本书 C 语言程序的编写也做了大量的工作。在此向他们表示衷心的感谢!

笔者在编写第 14 章的过程中,承蒙美国德州仪器(TI)香港有限公司提供了丰富的资料,TI 中国公司技术咨询中心袁怡先生仔细审阅了该章,提出了很好的建议,在此向 TI 香港有限公司及袁先生表示衷心的感谢。

限于作者的水平,不妥及错误之处在所难免,恳切希望读者给予批评指正。

作者

1996 年 8 月于清华大学

# 常用符号一览表

## 1. 运算符号

符号	意义
$\sum$	连加
$\prod$	连乘
*	取复数共轭, 如 $x^*$
*	信号的卷积, 如 $x(n) * h(n)$
$\circledast$	信号的循环卷积, 如 $x(n) \circledast h(n)$
T	向量或矩阵的转置, 如 $A^T$
H	向量或矩阵的共轭转置, 如 $A^H$
$\odot$	向量或矩阵对应元素相乘, 如 $A \odot B$
$\det(\cdot)$	矩阵行列式的值
$\text{rank}(\cdot)$	矩阵的秩
$\langle \cdot, \cdot \rangle$	两个向量(或信号)的内积, 如 $\langle x, y \rangle$
$\  \cdot \ $	向量的范数, 如 $\  x \ $
$ \cdot $	向量或复数的绝对值(模), 如 $ x(n) $
$\text{Re}[\cdot]$	复数的实部
$\text{Im}[\cdot]$	复数的虚部
$\langle \cdot \rangle$	求余, 如 $\langle a \rangle_b$ 表示 $a$ 对模 $b$ 求余数
mod	求余, 如 $a = b \text{ mod } c$ 表示 $a$ 和 $b$ 对模 $c$ 同余
$(\cdot, \cdot)$	求最大公约数, 如 $(a, b) = c$ 表示 $a$ 和 $b$ 的最大公约数为 $c$
$\lfloor \cdot \rfloor$	求最大整数, 如 $N = \lfloor p \rfloor$ 表示 $N$ 为小于或等于 $p$ 的最大整数
$T[\cdot]$	表示取变换, 如 $T[x]$ 表示对 $x$ 作某种变换
$E\{\cdot\}$	均值运算, 如 $\mu = E\{x\}$ 表示 $x$ 的均值为 $\mu$
$\mathcal{L}[\cdot]$	拉普拉斯正变换
$\mathcal{L}^{-1}[\cdot]$	拉普拉斯反变换
$\mathcal{F}[\cdot]$	傅里叶正变换
$\mathcal{F}^{-1}[\cdot]$	傅里叶反变换
$\mathcal{Z}[\cdot]$	Z 变换
$\mathcal{Z}^{-1}[\cdot]$	Z 反变换

DFT[·]	离散傅里叶变换
IDFT[·]	离散傅里叶反变换

## 2. 常用函数(或信号)专用字母

$\delta(t), \delta(n)$	单位冲激信号, 单位抽样信号
$u(t), u(n)$	单位阶跃信号, 单位阶跃序列(有时作为噪声信号)
$x(t), x(n)$	一般时域信号, 或系统的输入; 随机信号的一次实现
$y(t), y(n)$	一般时域信号, 或系统的输出; 随机信号的一次实现
$h(n), H(z), H(e^{j\omega})$	离散系统的单位抽样响应, 转移函数及频率响应
$h(t), H(s), H(j\Omega)$	连续系统的单位冲激响应, 转移函数及频率响应
$d(t), d(n)$	矩形函数
$w(n)$	一般窗函数
$p(n)$	脉冲串序列
$p(t)$	冲激串序列
$r(m), r(\tau)$	相关函数, $m$ 和 $\tau$ 分别为离散时间及连续时间的延迟
$P(e^{j\omega}), P(j\Omega)$	功率谱
$\hat{r}(m), \hat{P}(e^{j\omega})$	$r(m)$ 和 $P(e^{j\omega})$ 的估计值
$X(s), X(j\Omega),$ $X(e^{j\omega}), X(z), X(k)$ 等	频域信号
$X, Y$ 等	随机变量
$X(t), X(n)$ 等	随机信号
$x$ 等	时域向量
$X$ 等	频域向量
$R, W$ 等	矩阵或向量

## 3. 频率变量

$f$	实际频率, 单位为 Hz
$\Omega$	相对连续信号, 角频率 $\Omega = 2\pi f$ , 单位为 rad/s
$\omega$	相对离散信号, 圆频率(或圆周频率), 单位为 rad
$f'$	归一化频率, 无量纲, $f' = \omega/2\pi$



# 目 录

常用符号一览表 .....	XII
绪论 .....	1
0.1 数字信号处理的理论 .....	1
0.2 数字信号处理的实现 .....	2
0.3 数字信号处理的应用 .....	3
参考文献 .....	4
<b>第 1 章 离散时间信号与离散时间系统</b> .....	<b>5</b>
1.1 离散时间信号的基本概念 .....	5
1.2 信号的分类 .....	9
1.3 噪声 .....	11
1.4 信号空间的基本概念 .....	12
1.5 离散时间系统的基本概念 .....	14
1.6 LSI 系统的输入、输出关系 .....	18
1.7 LSI 系统的频率响应 .....	20
1.8 确定性信号的相关函数 .....	22
1.8.1 相关函数的定义 .....	22
1.8.2 相关函数和线性卷积的关系 .....	24
1.8.3 相关函数的性质 .....	25
1.8.4 相关函数的应用 .....	25
小结 .....	27
习题与上机练习 .....	27
参考文献 .....	30
<b>第 2 章 Z 变换及离散时间系统分析</b> .....	<b>31</b>
2.1 Z 变换的定义 .....	31
2.2 Z 变换的收敛域 .....	33
2.3 Z 变换的性质 .....	37
2.4 LSI 系统的转移函数 .....	39
2.5 IIR 系统的信号流图与结构 .....	43
2.5.1 IIR 系统的信号流图 .....	43
2.5.2 IIR 系统的直接实现 .....	44
2.5.3 IIR 系统的级联实现 .....	45

2.5.4 IIR 系统的并联实现 .....	46
2.6 逆 Z 变换 .....	46
2.6.1 幂级数法 .....	46
2.6.2 部分分式法 .....	47
2.6.3 留数法 .....	48
2.7 用 Z 变换求解差分方程 .....	50
小结 .....	51
习题与上机练习 .....	51
参考文献 .....	54
<b>第 3 章 离散时间信号的傅里叶变换及 DFT .....</b>	<b>55</b>
3.1 连续时间信号的傅里叶变换 .....	55
3.2 离散时间信号的傅里叶变换 .....	57
3.2.1 DTFT 的定义 .....	57
3.2.2 DTFT 的性质 .....	59
3.2.3 DTFT 的应用 .....	63
3.3 连续时间信号的抽样 .....	66
3.3.1 抽样定理 .....	66
3.3.2 信号的重建 .....	69
3.4 离散时间周期信号的傅里叶变换 .....	70
3.5 离散傅里叶变换(DFT) .....	71
3.5.1 DFT 的定义 .....	71
3.5.2 DFT 导出的图形解释 .....	72
3.5.3 DFT 与 DTFT 及 Z 变换之关系 .....	73
3.5.4 DFT 的性质 .....	74
3.6 用 DFT 计算线性卷积 .....	78
3.6.1 用 DFT 计算线性卷积的方法和步骤 .....	78
3.6.2 长序列卷积的计算 .....	79
3.7 与 DFT 有关的几个问题 .....	81
3.7.1 频率分辨率及 DFT 参数的选择 .....	81
3.7.2 补零问题 .....	82
3.7.3 DFT 对 FT 的近似 .....	84
3.8 关于正弦信号抽样的讨论 .....	88
3.8.1 抽样定理对正弦信号的适用性 .....	89
3.8.2 正弦信号抽样中的不确定性 .....	92
3.8.3 对正弦信号截短的原则 .....	93
3.9 二维傅里叶变换 .....	94
小结 .....	99
习题与上机练习 .....	99

参考文献	101
<b>第4章 其它常用的信号变换</b>	<b>103</b>
4.1 Hilbert 空间中的正交变换	103
4.2 K-L 变换	105
4.3 离散余弦变换(DCT)与离散正弦变换(DST)	107
4.3.1 DCT 的定义	107
4.3.2 DCT 和 K-L 变换的关系	108
4.3.3 DST 的定义及与 K-L 变换的关系	109
4.4 离散 Hartley 变换(DHT)	112
4.5 离散 W 变换(DWT)及正弦类变换	116
4.5.1 DWT 的定义	116
4.5.2 四种形式的 DCT 及 DST	118
4.5.3 DCT, DST 对 K-L 变换的近似性能	119
4.6 Hilbert 变换	120
4.6.1 连续时间信号的 Hilbert 变换	120
4.6.2 离散时间信号的 Hilbert 变换	122
4.6.3 Hilbert 变换的性质	123
4.6.4 实因果信号傅里叶变换的实部与虚部、对数幅度与相位之间的关系	124
4.7 窄带信号	126
4.7.1 窄带信号的表示及其 Hilbert 变换	126
4.7.2 窄带信号的抽样	128
小结	131
习题与上机练习	131
参考文献	131
<b>第5章 快速傅里叶变换</b>	<b>133</b>
5.1 概述	133
5.2 时间抽取(DIT)基 2 FFT 算法	135
5.2.1 算法的推导	135
5.2.2 算法的讨论	137
5.3 频率抽取(DIF)基 2 FFT 算法	139
5.4 进一步减少运算量的措施	141
5.4.1 多类蝶形单元运算	141
5.4.2 $W$ 因子的生成	142
5.4.3 实输入数据时的 FFT 算法	142
5.5 分裂基算法	143
5.5.1 频率抽取基 4 FFT 算法	143

5.5.2	分裂基算法	145
5.6	输入、输出端仅取少数点的 FFT 算法	149
5.6.1	原始输入数据中含有较多零时的 FFT 算法	149
5.6.2	输入输出端同时使用 FFT Pruning 算法	152
5.6.3	线性调频 Z 变换(CZT)	153
5.7	Winograd 快速傅里叶变换算法(WFTA)	156
5.7.1	下标映射(index mapping)	156
5.7.2	快速卷积算法	159
5.7.3	WFTA	167
5.7.4	素因子算法和 WFTA 所需计算量	169
5.8	DCT, DST 及 DWT 快速算法简述	170
5.8.1	DCT- I 快速算法的思路	171
5.8.2	DWT 快速算法的思路	172
5.8.3	DST- I 快速算法的思路	174
	小结	174
	习题与上机练习	175
	参考文献	176
<b>第 6 章</b>	<b>离散时间系统的相位、结构与状态变量描述</b>	<b>179</b>
6.1	离散时间系统的相频响应	179
6.1.1	线性相位	179
6.1.2	FIR DF 的线性相位特征	180
6.1.3	全通滤波器与最小相位滤波器	183
6.2	FIR 系统的结构	188
6.2.1	直接实现与级联实现	188
6.2.2	具有线性相位的 FIR 系统的结构	189
6.2.3	FIR 系统的递归实现及梳状滤波器	190
6.2.4	FIR 系统的频率抽样实现	191
6.3	离散时间系统的 Lattice 结构	192
6.3.1	全零点系统(FIR)的 Lattice 结构	192
6.3.2	全极点系统(IIR)的 Lattice 结构	195
6.3.3	极-零系统的 Lattice 结构	197
6.4	离散时间系统的内部描述	199
6.4.1	LSI 系统的状态变量与状态方程	199
6.4.2	由状态方程求系统的转移函数	202
6.4.3	由状态方程求系统的输出及单位抽样响应	203
	小结	205
	习题与上机练习	205
	参考文献	206

<b>第 7 章 无限冲激响应数字滤波器设计</b> .....	207
7.1 滤波器的基本概念 .....	207
7.1.1 滤波原理.....	207
7.1.2 滤波器的分类.....	207
7.1.3 滤波器的技术要求.....	209
7.2 模拟低通滤波器的设计 .....	211
7.2.1 概述.....	211
7.2.2 巴特沃思模拟低通滤波器设计.....	212
7.2.3 切比雪夫 I 型模拟低通滤波器设计.....	214
7.3 模拟高通、带通及带阻滤波器的设计.....	218
7.3.1 模拟高通滤波器的设计.....	219
7.3.2 模拟带通滤波器的设计.....	220
7.3.3 模拟带阻滤波器的设计.....	221
7.4 用冲激响应不变法设计 IIR 数字低通滤波器 .....	223
7.5 用双线性 Z 变换法设计 IIR 数字低通滤波器 .....	226
7.6 数字高通、带通及带阻滤波器的设计.....	229
小结.....	233
习题与上机练习.....	233
参考文献.....	233
<b>第 8 章 有限冲激响应数字滤波器设计</b> .....	235
8.1 FIR DF 设计的窗函数法 .....	235
8.2 窗函数 .....	241
8.3 FIR DF 设计的频率抽样法 .....	245
8.4 FIR DF 设计的切比雪夫逼近法 .....	249
8.4.1 切比雪夫最佳一致逼近定理.....	250
8.4.2 利用切比雪夫逼近理论设计 FIR DF .....	251
8.4.3 误差函数 $E(\omega)$ 的极值特性 .....	255
8.4.4 线性相位 FIR DF 四种形式的统一表示 .....	256
小结.....	261
习题与上机练习.....	261
参考文献.....	262
<b>第 9 章 其它类型的数字滤波器</b> .....	263
9.1 简单整系数数字滤波器 .....	263
9.1.1 建立在多项式拟合基础上的简单整系数滤波器.....	263
9.1.2 建立在极-零点抵消基础上的简单整系数滤波器.....	266
9.1.3 建立在二项式序列基础上的简单整系数滤波器.....	270
9.2 低阶低通差分滤波器 .....	274

9.3	几种常用的低通整系数差分滤波器 .....	278
9.4	抽样率转换滤波器 .....	281
9.4.1	信号的抽取 .....	282
9.4.2	信号的插值 .....	285
9.4.3	抽取与插值相结合的抽样率转换 .....	287
9.4.4	抽取与插值的滤波器实现 .....	289
	小结 .....	296
	习题与上机练习 .....	296
	参考文献 .....	296
<b>第 10 章</b>	<b>平稳随机信号</b> .....	<b>298</b>
10.1	随机信号及其特征描述 .....	298
10.1.1	随机变量 .....	298
10.1.2	随机信号及其特征的描述 .....	299
10.2	平稳随机信号 .....	301
10.3	平稳随机信号通过线性系统 .....	304
10.4	平稳随机信号的各态遍历性 .....	306
10.5	信号处理中的最小平方问题 .....	311
10.6	估计质量的评价 .....	313
10.7	功率谱估计概述 .....	313
	小结 .....	316
	习题与上机练习 .....	316
	参考文献 .....	318
<b>第 11 章</b>	<b>经典功率谱估计</b> .....	<b>320</b>
11.1	自相关函数的估计 .....	320
11.1.1	自相关函数的直接估计 .....	320
11.1.2	自相关函数的快速计算 .....	323
11.2	经典谱估计的基本方法 .....	324
11.2.1	直接法 .....	324
11.2.2	间接法 .....	325
11.2.3	直接法和间接法的关系 .....	325
11.3	直接法和间接法估计的质量 .....	327
11.3.1	$M=N-1$ 时的估计质量 .....	327
11.3.2	$M<N-1$ 时的估计质量 .....	333
11.4	直接法估计的改进 .....	334
11.4.1	Bartlett 法 .....	334
11.4.2	Welch 法 .....	335
11.4.3	Nuttall 法 .....	337

11.5	经典谱估计算法性能的比较	338
	小结	340
	习题与上机练习	340
	参考文献	341
<b>第 12 章</b>	<b>参数模型功率谱估计</b>	<b>342</b>
12.1	平稳随机信号的参数模型	342
12.2	AR 模型的正则方程与参数计算	344
12.3	AR 模型谱估计的性质及阶次 $p$ 的选择	348
	12.3.1 AR 模型谱估计的性质	348
	12.3.2 AR 模型阶次的选择	352
12.4	AR 模型的稳定性及对信号建模问题的讨论	353
	12.4.1 AR 模型的稳定性	353
	12.4.2 关于信号建模问题的讨论	356
12.5	关于线性预测的进一步讨论	358
12.6	AR 模型系数的求解算法	362
	12.6.1 自相关法	362
	12.6.2 Burg 算法	363
	12.6.3 改进的协方差方法	365
12.7	MA 模型及功率谱估计	367
	12.7.1 MA 模型及其正则方程	367
	12.7.2 MA 模型参数的求解方法	368
12.8	ARMA 模型及功率谱估计	369
12.9	最小方差功率谱估计(MVSE)	372
12.10	基于矩阵特征分解的频率估计及功率谱估计	374
	12.10.1 相关阵的特征分解	374
	12.10.2 基于信号子空间的频率估计及功率谱估计	375
	12.10.3 基于噪声子空间的频率估计及功率谱估计	375
	12.10.4 信号与噪声子空间维数的估计	379
12.11	现代谱估计各种算法性能的比较	379
	小结	382
	习题与上机练习	382
	参考文献	384
<b>第 13 章</b>	<b>非平稳随机信号的时-频分布</b>	<b>386</b>
13.1	概述	386
13.2	WVD 定义的解释	388
13.3	WVD 的性质	388
13.4	常用信号的 WVD	392

13.5	WVD 的实现 .....	395
13.6	时-频分布的统一表示形式 .....	398
13.6.1	Wigner 分布和模糊函数 .....	398
13.6.2	时-频分布的统一表示形式 .....	400
13.6.3	时-频分布所希望的性质及对核函数的制约 .....	403
13.6.4	关于交叉项及核函数的进一步讨论 .....	405
	小结 .....	409
	参考文献 .....	409
<b>第 14 章</b>	<b>数字信号处理的硬件实现 .....</b>	<b>411</b>
14.1	概述 .....	411
14.2	TMS320 系列的性能及结构特点 .....	415
14.2.1	TMS320 系列的主要性能指标 .....	415
14.2.2	TMS320C2X 的性能与结构 .....	416
14.2.3	TMS320C3X/4X/5X 性能简介 .....	424
14.2.4	TMS320C80 的性能与结构简介 .....	427
14.3	TMS320C2X 的指令系统 .....	429
14.3.1	TMS320C2X 指令的特点 .....	429
14.3.2	TMS320C2X 的寻址方式 .....	430
14.3.3	TMS320C2X 的指令集 .....	432
14.4	基于 TMS320 系列 DSP 系统的设计与调试 .....	441
14.4.1	系统设计的总体考虑 .....	441
14.4.2	软件开发工具 .....	443
14.4.3	硬件系统集成及调试工具 .....	444
	小结 .....	447
	参考文献 .....	447
<b>附录 A</b>	<b>计算机程序使用说明 .....</b>	<b>448</b>
<b>附录 B</b>	<b>功率谱估计试验数据 .....</b>	<b>451</b>
<b>附录 C</b>	<b>部分计算机程序清单 .....</b>	<b>453</b>
	索引 .....	486



## 绪 论

自 60 年代以来,随着计算机和信息学科的飞速发展,数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)技术应运而生并迅速发展,现已形成一门独立的学科体系。目前在国内外绝大部分重点工科院校中,都已把“数字信号处理”列为技术基础课,作为部分专业研究生和本科生的必修课或选修课。特别是国外的重点高校,都建立有信号处理中心,把教学、科研、人材培养紧密结合起来,不但在理论上而且在实际运用上都取得了丰硕的成果。目前,以 DSP 芯片及外围开发设备为主,正在形成一个具有较大潜力的产业与市场。

简单地说,数字信号处理是利用计算机或专用处理设备,以数值计算的方法对信号进行采集、变换、综合、估值与识别等加工处理,借以达到提取信息和便于应用的目的。数字信号处理技术及设备具有灵活、精确、抗干扰强、设备尺寸小、造价低、速度快等突出优点,这些都是模拟信号处理技术与设备所无法比拟的。

众所周知,几乎所有的工程技术领域都要涉及到信号问题。这些信号包括电的、磁的、机械的、热的、声的、光的及生物体的等等各个方面。如何在较强的背景噪声下提取出真正的信号或信号的特征并将其应用于工程实际是信号处理技术要完成的任务。因此可以说,信号处理几乎涉及到所有的工程技术领域。

近 20 多年来,数字信号处理是紧紧围绕着理论、实现及应用三个方面迅速发展起来的,它以众多的学科为理论基础,其成果又渗透到众多的学科,成为理论与实践并重、在高新技术领域中占有重要地位的新兴学科。

### 0.1 数字信号处理的理论

数字信号处理在理论上所涉及的范围极其广泛。在数学领域中,微积分、概率统计、随机过程、高等代数、数值分析、近世代数、复变函数等等都是它的基本工具,网络理论、信号与系统等均是它的理论基础。在学科发展上,数字信号处理又和最优控制、通信理论、故障诊断等紧紧相连,近年来又成为人工智能、模式识别、神经网络等新兴学科的理论基础之一,其算法的实现(无论是硬件和软件)又和计算机学科及微电子技术密不可分。因此可以说,数字信号处理是把经典的理论体系(如数学、系统)作为自己的理论基础,同时又使自己成为一系列新兴学科的理论基础。

在国际上,一般把 1965 年快速傅里叶变换(FFT)的问世,作为数字信号处理这一新学科的开端。在这 30 余年的发展过程中,数字信号处理自身已基本形成一套较为完整的理论体系。这些理论主要包括:

- ① 信号的采集(A/D 技术、抽样定理、多抽样率、量化噪声分析等);
- ② 离散信号的分析(时域及频域分析、各种变换技术、信号特征的描述等);