



北京市高等教育精品教材立项项目

胡广书 编著



清华大学电子与信息技术系列教材

数字信号处理

理论、算法与实现

第二版

研究生教学用书
教育部研究生工作办公室推荐

清华大学出版社

北京市高等教育精品教材立项项目

TN 911.72

H 571

胡广书 编著



清华大学电子与信息技术系列教材

数字信号处理

理论、算法与实现



A1100664

第二版

研究生教学用书
教育部研究生工作办公室推荐



清华大学出版社
北京

MA 652/08

内 容 简 介

本书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,分为上、下两篇,每篇各 7 章。上篇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、离散傅里叶变换、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)等;下篇内容包括信号的正交变换(正交变换的定义与性质、K-L 变换、DCT 及其在图像压缩中的应用)、信号处理中若干典型算法(如抽取与插值、子带分解、调制与解调、反卷积、SVD、独立分量分析及同态滤波等)、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、数字信号处理中的有限字长问题及数字信号处理的硬件实现等内容。

书中介绍了数字信号处理中所涉及的绝大部分 MATLAB 文件,并给出了使用的具体实例。所附光盘中包含 40 个分别用 FORTRAN 语言和 C 语言编写的信号处理子程序,此外还包含了近 100 个用 MATLAB 编写的信号处理程序,这些 MATLAB 程序可用于求解书中的绝大部分例题并绘制其插图。除第 14 章外,本书每一章都配有习题及上机练习题。

本书阐述了数字信号处理的基础理论与概念,同时尽量反映该学科在近 20 年来的新进展。书中章节安排合理,说理详细,论证清晰,便于自学。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,也可供工程技术人员自学参考。

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. —2 版. —北京:清华大学出版社,2003
(清华大学电子与信息技术系列教材)

ISBN 7-302-06506-3

I. 数… II. 胡… 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(2003)第 023989 号

出 版 者:清华大学出版社

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

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客 户 服 务:010-62776969

责任编辑:王仁康

版式设计:刘祯森

印 刷 者:清华大学印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:41.75 字数:858 千字

版 次:2003 年 8 月第 2 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-06506-3/TN·139

印 数:1~5000

定 价:49.80 元(含光盘)

法、分裂基算法和频域细化的 CZT 算法,并简要介绍了 Winograd 快速傅里叶变换的主要内容。

第 5 章内容是第 2 章的延续和深入,主要涉及离散时间系统的相位、结构及状态变量描述等基本问题,包括线性相位的定义、线性相位系统零点分布、全通系统、最小相位系统、谱分解以及离散系统的 Lattice 结构和状态变量分析等。

第 6、第 7 两章集中讨论数字滤波器的设计问题。前者讨论 IIR 滤波器的设计,后者讨论 FIR 滤波器的设计,并简要介绍了一些特殊形式滤波器的设计。

本书下篇中第 8 章介绍了信号正交分解及正交变换的基本概念,特别是针对 K-L 变换的不足,重点介绍了离散余弦变换,同时介绍了信号处理中的其他正交变换。此外,为使读者了解这些正交变换的应用,还增加了图像压缩的内容。

在前 8 章系统地讨论了有关信号处理理论的基础上,我们选择了信号处理中的 7 个典型算法在第 9 章给予介绍,目的是让读者了解和掌握更多的信号处理的内容以及它们应用的背景。这些算法是:信号的抽取与插值、子带分解、调制与解调、反卷积、奇异值分解、独立分量分析及同态滤波等。它们有的是经典内容,有的是近十几年来新发展的内容。

第 10 至第 12 章讨论随机信号的统计处理。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,内容包括自相关函数的估计、功率谱估计的周期图法与自相关法,还包括估计的性能及改进方法与短时傅里叶变换。现代功率谱估计是近 30 年来信号处理中最为活跃的内容之一,因此我们在第 12 章讨论了这一领域的主要内容,即参数模型法,包括 AR、MA 及 ARMA 模型。此外,还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等。

尽管使用高精度的 A/D 转换器可以大大减轻有限字长所带来的误差及其影响,但是,有限字长问题毕竟是数字信号处理中的基本问题,特别是当用硬件来具体实现一个数字系统时,掌握这些误差的行为,了解它们对系统的影响是每一个设计者所必须考虑的。通过第 13 章关于数字信号处理中的有限字长问题的讨论,读者可进一步了解随机信号统计分析的应用。

第 14 章以美国 TI 公司的 TMS320 系列 DSP 为主集中介绍了 DSP 硬件的结构、性能、软件和硬件的开发方法及工具等,同时还介绍了 DSP 的应用。

MATLAB 是学习和应用数字信号处理的一个极好的工具。因此,本书在 1.9 节简要介绍了 MATLAB 的功能,在第 1 至第 12 章的最后一节都对该章所涉及的 MATLAB 文件给予了说明,并给出了使用的具体实例。通过 MATLAB 的应用,读者可以掌握应用 MATLAB 实现信号处理的方法,同时更深入地理解数字信号处理的理论。

本书所附光盘包含 40 个分别用 FORTRAN 和 C 语言编写的信号处理子程序以及近 100 个用 MATLAB 编写的信号处理程序,后者是本书各个章节的大部分例题。这些

MATLAB 程序都很短,通过程序的运行可以掌握这些例题的求解方法及 MATLAB 的编程方法。

本书内容丰富,既包含了数字信号处理中的经典内容,也包含了部分前沿内容;编写中注重理论和应用相结合,特别注重应用 MATLAB 来解决理论和算法的实现问题。通过本书的学习,读者可以掌握数字信号处理的主要内容。

本书的篇幅较大,在一个学期的教学中讲授全部内容是不可能的,当然也没有必要。笔者在使用这本教材的过程中采用的方法大体是“重要的基础理论内容重点讲,方法性的内容概括讲,前沿性(或交叉性)的内容用讲座讲”。为了方便组织教学,笔者将可以概括讲、用讲座讲,或让研究生自己阅读的部分,在标题前标注了“*”,供读者选用。

本书定位于理工科的研究生教材,也可作为相关专业的本科生教材。用作本科生教材时,可将上篇及下篇的部分章节(如第 14 章)作为主讲内容,其余内容可作为课外阅读材料。同时本书也可供从事数字信号处理研究与应用的广大科技人员学习与参考。

本书第一版 1997 年出版以来,得到了使用本书作为教材的老师、研究生以及广大读者们的热情关心,他们对本书提出了许多非常好的建议。2000 年,本书被教育部研究生工作办公室推荐为“研究生教学用书”,2001 年,本书入选“北京市高等教育精品教材立项项目”。读者的期望及上级部门的肯定既是鼓励,又是鞭策,促使笔者完成了本书的修订。在此,向广大的读者及使用本书的老师表示衷心的感谢!

作者在编写本书和承担清华大学研究生公共课“数字信号处理”的过程中得到了清华大学研究生院、电机工程系及生物医学工程研究所的关心与支持,在此向他们表示衷心的感谢!在本书的编写过程中始终得到了宗孔德教授、杨福生教授和周礼杲教授的热情关心和支持,在本书再版之际,谨向三位教授致以诚挚的谢意!

张辉为本书第 14 章编写了部分内容并提供了大量的资料;王俊峰、劳长安、汪学愚、李义翔、李晓娟、洪波、朱常芳、丁海艳、孙勇、刘冰、肖宪波、徐进、刘少颖等在本书的绘图、计算机程序的编写、整理以及资料搜集等各个方面都做了大量的工作,在此一并表示感谢!

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

2003 年 3 月 于清华大学

e-mail: hgs-dea@tsinghua. edu. cn

$\mathcal{F}[\cdot]$	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 $[\cdot]$	离散傅里叶变换
IDFT $[\cdot]$	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 τ 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
Ω	相对连续信号的角频率, $\Omega=2\pi f$,单位为 rad/s
ω	相对离散信号的圆频率(或圆周频率),单位为 rad
f'	归一化频率, $f'=\omega/2\pi$,无量纲

1.9 关于 MATLAB	39
1.10 与本章内容有关的 MATLAB 文件	42
小结	49
习题与上机练习	49
参考文献	53
第 2 章 Z 变换及离散时间系统分析	54
2.1 Z 变换的定义	54
2.2 Z 变换的收敛域	57
2.3 Z 变换的性质	62
2.4 逆 Z 变换	66
2.4.1 幂级数法	66
2.4.2 部分分式法	67
2.4.3 留数法	67
2.5 LSI 系统的转移函数	70
2.5.1 转移函数的定义	70
2.5.2 离散系统的极零分析	71
2.5.3 滤波的基本概念	75
2.6 IIR 系统的信号流图与结构	78
2.6.1 IIR 系统的信号流图	78
2.6.2 IIR 系统的直接实现	78
2.6.3 IIR 系统的级联实现	80
2.6.4 IIR 系统的并联实现	80
2.7 用 Z 变换求解差分方程	81
2.8 与本章内容有关的 MATLAB 文件	83
小结	89
习题与上机练习	89
参考文献	92
第 3 章 离散时间信号的傅里叶变换	93
3.1 连续时间信号的傅里叶变换	94
3.1.1 连续周期信号的傅里叶级数	94
3.1.2 连续非周期信号的傅里叶变换	95
3.1.3 傅里叶级数和傅里叶变换的区别与联系	96

3.2	离散时间信号的傅里叶变换(DTFT)	100
3.2.1	DTFT 的定义	100
3.2.2	DTFT 的性质	102
* 3.2.3	关于 DTFT 存在的条件	107
3.2.4	一些典型信号的 DTFT	109
3.2.5	信号截短对 DTFT 的影响	112
3.3	连续时间信号的抽样	115
3.3.1	抽样定理	115
3.3.2	信号的重建	118
3.4	离散时间周期信号的傅里叶级数	119
3.5	离散傅里叶变换(DFT)	121
3.5.1	DFT 的定义	121
3.5.2	DFT 导出的图形解释	123
3.5.3	DFT 与 DTFT 及 Z 变换之关系	124
3.5.4	DFT 的性质	125
3.6	用 DFT 计算线性卷积	129
3.6.1	用 DFT 计算线性卷积的方法和步骤	129
3.6.2	长序列卷积的计算	131
3.7	与 DFT 有关的几个问题	133
3.7.1	频率分辨率及 DFT 参数的选择	133
3.7.2	补零问题	137
3.7.3	DFT 对 FT 的近似	138
* 3.8	关于正弦信号抽样的讨论	143
3.8.1	抽样定理对正弦信号的适用性	144
3.8.2	正弦信号抽样中的不确定性	148
3.8.3	对正弦信号截短的原则	149
* 3.9	二维傅里叶变换	150
3.10	希尔伯特变换	156
3.10.1	连续时间信号的希尔伯特变换	157
3.10.2	离散时间信号的希尔伯特变换	159
3.10.3	希尔伯特变换的性质	160
3.10.4	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	161
3.11	与本章内容有关的 MATLAB 文件	163

小结	165
习题与上机练习	166
参考文献	168
第 4 章 快速傅里叶变换	169
4.1 概述	169
4.2 时间抽取(DIT)基 2 FFT 算法	171
4.2.1 算法的推导	171
4.2.2 算法的讨论	173
4.3 频率抽取(DIF)基 2 FFT 算法	176
4.4 进一步减少运算量的措施	178
4.4.1 多类蝶形单元运算	178
4.4.2 W 因子的生成	179
4.4.3 实输入数据时的 FFT 算法	180
4.5 分裂基算法	180
4.5.1 频率抽取基 4 FFT 算法	180
4.5.2 分裂基算法	181
4.6 输入、输出端仅取少数点的 FFT 简化算法	187
* 4.6.1 原始输入数据中含有较多零时的 FFT 简化算法	187
* 4.6.2 输入输出端同时使用 FFT 简化算法	190
4.6.3 线性调频 Z 变换(CZT)	192
* 4.7 Winograd 快速傅里叶变换算法	195
4.7.1 下标映射	195
4.7.2 快速卷积算法	198
4.7.3 WFTA 的公式表示	208
4.7.4 素因子算法和 WFTA 所需计算量	210
4.8 与本章内容有关的 MATLAB 文件	212
小结	214
习题与上机练习	214
参考文献	216
第 5 章 离散时间系统的相位、结构与状态变量描述	218
5.1 离散时间系统的相频响应	218
5.2 FIR 系统的线性相位特性	221

5.3	具有线性相位特性的 FIR 系统的零点分布	223
5.4	全通系统与最小相位系统	226
5.4.1	全通系统	226
5.4.2	最小相位系统	229
5.5	谱分解	232
5.6	FIR 系统的结构	234
5.6.1	直接实现与级联实现	235
5.6.2	具有线性相位的 FIR 系统的结构	235
5.6.3	FIR 系统的频率抽样实现	235
5.7	离散时间系统的 Lattice 结构	237
5.7.1	全零点系统(FIR)的 Lattice 结构	238
5.7.2	全极点系统(IIR)的 Lattice 结构	241
5.7.3	极零系统的 Lattice 结构	243
5.8	离散时间系统的内部描述	246
5.8.1	LSI 系统的状态变量与状态方程	246
5.8.2	由状态方程求系统的转移函数	249
5.8.3	由状态方程求系统的输出及单位抽样响应	250
5.9	与本章内容有关的 MATLAB 文件	253
	小结	255
	习题与上机练习	256
	参考文献	257
第 6 章	无限冲激响应数字滤波器设计	259
6.1	滤波器的基本概念	259
6.1.1	滤波器的分类	259
6.1.2	滤波器的技术要求	261
6.2	模拟低通滤波器的设计	263
6.2.1	概述	263
6.2.2	巴特沃思模拟低通滤波器的设计	264
6.2.3	切比雪夫 I 型模拟低通滤波器的设计	267
6.3	模拟高通、带通及带阻滤波器的设计	272
6.3.1	模拟高通滤波器的设计	272
6.3.2	模拟带通滤波器的设计	274
6.3.3	模拟带阻滤波器的设计	276

* 6.4	用冲激响应不变法设计 IIR 数字低通滤波器	277
6.5	用双线性 Z 变换法设计 IIR 数字低通滤波器	281
6.6	数字高通、带通及带阻滤波器的设计	285
6.7	与本章内容有关的 MATLAB 文件	289
	小结	293
	习题与上机练习	294
	参考文献	294
第 7 章	有限冲激响应数字滤波器设计	296
7.1	FIR 数字滤波器设计的窗函数法	296
7.2	窗函数	303
* 7.3	FIR 数字滤波器设计的频率抽样法	308
7.4	FIR 数字滤波器设计的切比雪夫逼近法	313
7.4.1	切比雪夫最佳一致逼近原理	314
7.4.2	利用切比雪夫逼近理论设计 FIR 数字滤波器	315
7.4.3	误差函数 $E(\omega)$ 的极值特性	318
7.4.4	线性相位 FIR 数字滤波器四种形式的统一表示	321
7.4.5	设计举例	324
7.4.6	滤波器阶次的估计	326
7.5	几种简单形式的滤波器	327
7.5.1	平均滤波器	328
7.5.2	平滑滤波器	330
7.5.3	梳状滤波器	333
* 7.6	建立在极零点抵消基础上的简单整系数滤波器	335
* 7.7	低阶低通差分滤波器	341
7.7.1	最佳低阶低通差分滤波器的导出	341
7.7.2	几种常用的低通整系数差分滤波器	345
7.8	滤波器设计小结	350
7.9	与本章内容有关的 MATLAB 文件	351
	小结	356
	习题与上机练习	356
	参考文献	358

下 篇

第 8 章 信号处理中常用的正交变换	363
8.1 希尔伯特空间中的正交变换	363
8.1.1 信号的正交分解.....	363
8.1.2 正交变换的性质.....	366
8.1.3 正交变换的种类.....	367
8.2 K-L 变换	368
8.3 离散余弦变换(DCT)与离散正弦变换(DST)	371
8.3.1 DCT 的定义	371
8.3.2 DCT 和 K-L 变换的关系	372
8.3.3 DST 的定义及与 K-L 变换的关系	373
* 8.4 离散 Hartley 变换(DHT)	376
* 8.5 离散 W 变换(DWT)及正弦类变换	380
8.5.1 DWT 的定义	380
8.5.2 四种形式的 DCT 及 DST	382
8.5.3 DCT, DST 对 K-L 变换的近似性能	384
* 8.6 DCT, DST 及 DWT 快速算法简述	386
8.6.1 DCT-II 快速算法的思路	386
8.6.2 DWT 快速算法的思路	387
8.6.3 DST-I 快速算法的思路	390
* 8.7 图像压缩简介	390
8.7.1 图像的基本概念.....	390
8.7.2 图像压缩的基本概念.....	392
8.7.3 图像压缩国际标准简介.....	398
* 8.8 重叠正交变换	400
8.9 与本章内容有关的 MATLAB 文件	404
小结.....	405
习题与上机练习.....	406
参考文献.....	407
第 9 章 信号处理中的若干典型算法	409
9.1 信号的抽取与插值	409

9.1.1	信号的抽取	410
9.1.2	信号的插值	413
9.1.3	抽取与插值相结合的抽样率转换	415
9.1.4	抽取与插值的滤波器实现	417
9.2	信号的子带分解及滤波器组的基本概念	424
9.3	窄带信号及信号的调制与解调	429
9.3.1	窄带信号	429
9.3.2	信号的调制与解调	432
9.3.3	窄带信号的抽样	435
9.4	逆系统、反卷积及系统辨识	438
* 9.5	奇异值分解	441
* 9.6	独立分量分析简介	446
* 9.7	同态滤波及复倒谱简介	448
9.8	与本章内容有关的 MATLAB 文件	451
	小结	456
	习题与上机练习	456
	参考文献	458
第 10 章	平稳随机信号	460
10.1	随机信号及其特征描述	460
10.1.1	随机变量	460
10.1.2	随机信号及其特征的描述	464
10.2	平稳随机信号	467
10.2.1	平稳随机信号的定义	467
10.2.2	平稳随机信号的自相关函数	467
10.2.3	平稳随机信号的功率谱	470
10.2.4	一阶马尔可夫过程	472
10.3	平稳随机信号通过线性系统	473
10.4	平稳随机信号的各态遍历性	476
10.5	信号处理中的最小平方估计问题	481
10.5.1	确定性信号处理中的最小平方问题	481
10.5.2	随机信号参数的最小均方估计	483
10.5.3	随机信号的线性最小均方滤波	484
10.6	估计质量的评价	485

10.7	功率谱估计概述	486
10.8	与本章内容有关的 MATLAB 文件	489
	小结	492
	习题与上机练习	492
	参考文献	495
第 11 章	经典功率谱估计	496
11.1	自相关函数的估计	496
11.1.1	自相关函数的直接估计	496
11.1.2	自相关函数的快速计算	499
11.2	经典谱估计的基本方法	501
11.2.1	直接法	501
11.2.2	间接法	502
11.2.3	直接法和间接法的关系	502
11.3	直接法和间接法估计的质量	504
11.3.1	$M=N-1$ 时的估计质量	504
11.3.2	$M<N-1$ 时的估计质量	511
11.4	直接法估计的改进	512
11.4.1	Bartlett 法	513
11.4.2	Welch 法	514
11.4.3	Nuttall 法	516
11.5	经典谱估计算法性能的比较	517
11.6	短时傅里叶变换	519
11.7	与本章内容有关的 MATLAB 文件	523
	小结	524
	习题与上机练习	425
	参考文献	526
第 12 章	参数模型功率谱估计	527
12.1	平稳随机信号的参数模型	527
12.2	AR 模型的正则方程与参数计算	529
12.3	AR 模型谱估计的性质及阶次的选择	534
12.3.1	AR 模型谱估计的性质	534
12.3.2	AR 模型阶次的选择	540