

胡广书 编著



清华大学电子与信息技术系列教材

现代信号处理教程

34

清华大学出版社

清华大学电子与信息技术系列教材

现代信号处理教程

胡广书 编著

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是研究生数字信号处理提高课的教材。全书共 13 章,涵盖了‘现代信号处理’中时频分析、滤波器组及小波变换这三大知识体系。编写中,力求注重理论和应用相结合,力求有利于教学和读者的自学,力求较为全面地反映这三个知识体系的主要内容。

本书附光盘一张,包含了 100 余个用 MATLAB 6.5 编写的程序和一些数据文件。这些程序概括了书中所涉及的绝大部分例题和插图,运行这些程序即可重现这些例题的结果和相应的插图,有利于帮助读者理解书中较为复杂的理论内容。

本书可作为理工科研究生的教材及参考书,也可作为工程技术人员的自学参考书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13901104297 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

现代信号处理教程/胡广书编著. —北京:清华大学出版社,2004.11

(清华大学电子与信息技术系列教材)

ISBN 7-302-09507-8

I. 现… II. 胡… III. 信号处理—研究生—教材 IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 094190 号

出 版 者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 客 户 服 务:010-62776969

组稿编辑:陈国新

文稿编辑:陈 力

版式设计:刘祎森

印 刷 者:北京市昌平环球印刷厂

装 订 者:北京国马印刷厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:27 字数:551 千字

版 次:2004 年 11 月第 1 版 2004 年 11 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-09507-8/TN·212

印 数:1~3000

定 价:38.00 元(含光盘)

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

0010010101011001001100100111101010010011010100100101

随着信息科学的飞速发展,信号处理的理论在过去的 30 年中也获得了迅速的发展。新理论和新的算法层出不穷,如时频分析、多抽样率信号处理、小波变换、自适应信号处理、现代谱估计、高阶统计量分析、智能信号处理以及独立分量分析等。至于信号处理的应用,已涉及几乎所有的工程技术领域,特别是以 DSP 芯片为基础的实时信号处理,已在移动通信、数字电视、数码相机、智能化仪器仪表、国防及生物医学工程等领域获得了广泛的应用。

作为一门课的教材,不可能,也没有必要涉及现代信号处理的所有内容。因此,本书从现代信号处理的庞大知识体系中选择了三个既相互独立、又有着密切联系,同时又是相当重要的内容作为本书的主题。这三部分内容是非平稳信号的时频分析、多抽样率信号处理中的滤波器组理论和小波变换。

本书共 13 章,分为 3 篇。第 1 篇含第 1~4 章,讨论信号的时频分析,第 2 篇含第 5~8 章,讨论滤波器组,它是多抽样率信号处理的主要内容。第 3 篇含第 9~13 章,讨论小波变换。

第1章是全书所有章节的基础。该章首先讨论了傅里叶变换的不足以及人们为改进这些不足所提出的种种方法。对这些不足的改进实际上是推动现代信号处理理论发展的原因之一。在此基础上,该章还讨论了信号的时宽和带宽、时间中心和频率中心、不定原理、瞬时频率、信号的分解、正交变换的性质以及标架的概念等。这些知识,贯穿于本书的始终。

第2章首先介绍了短时傅里叶变换的概念与性质,然后介绍了信号的 Gabor 展开及 Gabor 变换的计算。在第3章较为详细地讨论了 Wigner 分布的定义、性质与计算,特别是交叉项的行为及去除交叉项的思路。第4章集中讨论了 Cohen 类分布的定义,特别是利用模糊函数去除交叉项的方法,给出了在整体框架上时频分布统一表示的形式及各种分布性能的比较。

在第2篇中,首先在第5章详细讨论了信号的抽取、插值以及信号的多相表示、抽取与插值的实现等基本问题。然后在第6章讨论了滤波器组的基本概念,重点是半带滤波器及其实现,同时举例介绍了抽取与插值的应用。第7章是本篇的重点,首先给出了两通道滤波器组在时域和频域的输入输出关系,然后围绕着如何实现准确重建来消除混叠失真、幅度失真及相位失真。共轭正交镜像(CQM)滤波器组是得到广泛应用并被广泛研究的一种滤波器组,该章以较大的篇幅讨论了它的特点、设计及Lattice结构等问题。第8章讨论 M 通道滤波器组,涉及滤波器组的输入输出关系以及准确重建的条件,特别强调余弦调制滤波器组的性质及设计方法。

第3篇讨论信号的小波变换。小波变换是近十多年来迅速发展并被广泛应用的信号处理的新理论,该理论内容十分丰富。第9章介绍了小波变换的基本概念、小波变换的性质、小波的种类、连续小波变换的计算及小波标架,这些内容是进一步学习小波变换的基础。第10章集中讨论了小波变换的多分辨率分析及离散小波变换的实现等重要内容。通过这些内容的讨论,一方面将小波变换和滤波器组联系起来,另一方面使读者能较为全面地理解小波变换是信号分析的“数学显微镜”的道理。第11章讨论正交小波的构造问题,其中涉及小波的消失矩、规则性及有限支撑等重要概念。第12章集中讨论了三部分内容,一是双正交小波的构造问题,二是小波包的概念,三是从20世纪90年代中期提出的小波提升方案的基本思路。小波提升方案被认为是构造第二代小波的主要工具。

作为小波变换的应用,同时也是对小波变换理论的进一步介绍,在第13章介绍了两部分内容,一是小波变换在信号奇异性中的检测问题,二是基于小波变换的去噪问题。这两个问题都是信号处理中的基本问题,而小波变换在解决这两个问题方面发挥了很好的作用。

时频分析的主要思想是将时间和频率结合起来对信号进行分析和处理,它弥补了傅里叶变换缺少定位功能的缺点;小波变换也是一种时频分布,因此,第3篇的内容可以看作是第1篇内容的继续。滤波器组采用均匀或非均匀的方法将信号的频带按需要作各种形式的剖分,即实现信号的子带分解,它既有其独立的应用背景,也是实现小波变换的主要工具。因此本书这三篇的内容既相对独立,又有着密切的关系。

本书内容丰富,涵盖了现代信号处理的三大知识体系,即时频分析、滤波器组及小波变换。在编写中,笔者力求注重理论和应用相结合,力求有助于教学和自学,力求较为全面地反映这三个知识体系的主要内容。

本书附光盘一张,包含了100余个用MATLAB 6.5编写的程序和一些数据文件。这些程序概括了书中所涉及的绝大部分例题和插图,运行这些程序即可重现这些例题的结果和相应的插图。这些程序一般都很短,容易看懂,通过它们可以帮助读者理解书中较为复杂的理论内容。

在本书的编写过程中,笔者主要参考了文献[Qia95],[Aug95],[Vai93],[Dau92a],

[Ma197]及[ZW3]。在此,向这些著作的作者表示衷心的感谢!

本书是在多年使用的讲义的基础上反复修改而成。其中,采纳了选课研究生很多好的建议。在此向他们表示衷心的感谢!

张辉、朱常芳、陈戟、黄惠芳、刘冰、肖宪波、秦瑜斐、韩峰、刘少颖、马烈天、卢继来、李玥、崔云峰、关添等同志为本书的录入、绘图、程序编写、资料收集等都做了大量的工作,在此向他们表示衷心的感谢!

限于作者的水平,加之时间仓促,书中肯定存在不少错误及不妥之处,恳切希望读者给予批评指正。

作 者

2004 年 5 月 于清华大学

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

001001010101100100110010011111010100100



1. 运算符符号

符号	意义
Σ	连加
Π	连乘
$*$	信号的卷积, 如 $x(n) * h(n)$
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
$\langle \cdot, \cdot \rangle$	两个向量(或信号)的内积, 如 $\langle x, y \rangle$
$\ \cdot \ $	向量的范数, 如 $\ x\ $
$\langle \cdot \rangle_a$	求余, 如 $\langle a \rangle_b$ 表示 a 对模 b 求余数
$\lfloor * \rfloor$	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
WT	表示取小波变换, 如 WT_x 表示对 x 做小波变换
$E\{\cdot\}$	均值运算, 如 $\mu = E\{x\}$ 表示 x 的均值是 μ
$\sup$	求上确界
$\inf$	求下确界
$\oplus$	直和

2. 常用函数(或信号)专用字母

$\delta(t), \delta(n)$	单位冲击信号, 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
$y(t), y(n)$	一般时域信号或系统的输出
$h(n), H(z), H(e^{j\omega})$	离散系统的单位抽样响应, 转移函数及频率响应
$X(j\Omega), X(e^{j\omega}), X(z)$	频域信号
$\mathbf{x}, \mathbf{y}$ 等	时域向量

X, Y 等

频域向量

R, W 等

矩阵

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, $\Omega = 2\pi f$, 单位是 rad/s

ω

相对离散信号的圆频率(或圆周频率), 单位为 rad; $\omega = 2\pi f/f_s$, f_s 是抽样频率

4. 集合与空间

Z

整数集合

Z^+

正整数集合

R

实数集合

C

复数集合

$L^2(R)$

有限能量信号(函数)的空间

0010010101011001001100100111110101001001



第1篇 时频分析

第 1 章	信号分析基础	3
1.1	信号的时间与频率	3
1.2	克服傅里叶变换不足的一些主要方法	10
1.3	信号的时宽与带宽	17
1.4	不定原理	23
1.5	信号的瞬时频率	24
1.6	信号的分解	28
1.7	正交变换	33
1.8	标架的基本概念	39
1.9	Poisson 和公式	45
1.10	Zak 变换	47
第 2 章	短时傅里叶变换与 Gabor 变换	52
2.1	连续信号的短时傅里叶变换	52
2.2	短时傅里叶反变换	58
2.3	离散信号的短时傅里叶变换	60
2.4	Gabor 变换的基本概念	61
2.5	临界抽样情况下连续信号 Gabor 展开系数的计算	64
2.6	过抽样情况下连续信号 Gabor 展开系数的计算	66
第 3 章	Wigner 分布	72
3.1	Wigner 分布的定义	72

3.2	WVD 的性质	74
3.3	常用信号的 WVD	80
3.4	Wigner 分布的实现	85
3.5	Wigner 分布中交叉项的行为	89
3.6	平滑 Wigner 分布	94
第 4 章	Cohen 类时频分布	97
4.1	引言	97
4.2	Wigner 分布与模糊函数	97
4.3	Cohen 类时频分布	103
4.4	时频分布所希望的性质及对核函数的制约	106
4.5	核函数对时频分布中交叉项的抑制	110
4.6	减少交叉项干扰的核的设计	114

第 2 篇 滤波器组

第 5 章	信号的抽取与插值	121
5.1	引言	121
5.2	信号的抽取	122
5.3	信号的插值	127
5.4	抽取与插值相结合的抽样率转换	129
5.5	信号的多相表示	132
5.6	多抽样率系统中的几个恒等关系	134
5.7	抽取和插值的滤波器实现	137
5.7.1	抽取的滤波器实现	137
5.7.2	插值的滤波器实现	139
5.7.3	抽取和插值相结合的滤波器实现	139
第 6 章	滤波器组基础	142
6.1	滤波器组的基本概念	142
6.2	滤波器组的种类及有关的滤波器	145
6.2.1	最大均匀抽取滤波器组	145
6.2.2	正交镜像滤波器组	146
6.2.3	第 M 带滤波器	147

6.2.4 半带滤波器	149
6.2.5 互补型滤波器	151
6.3 半带滤波器设计	154
6.4 多抽样率系统的应用简介	156
第7章 两通道滤波器组	161
7.1 两通道滤波器组中各信号的关系	161
7.2 $G_0(z)$ 和 $G_1(z)$ 的选择	163
7.3 标准正交镜像滤波器组	166
7.3.1 标准正交镜像滤波器组中的基本关系	166
7.3.2 FIR 标准正交镜像滤波器组	169
7.3.3 IIR 标准正交镜像滤波器组	171
7.4 共轭正交镜像滤波器组	177
7.5 共轭正交镜像滤波器的设计	181
7.6 仿酉滤波器组	185
7.7 两通道仿酉滤波器组的 Lattice 结构	188
7.7.1 FIR 系统的 Lattice 结构	189
7.7.2 功率互补 FIR 系统的 Lattice 结构	190
7.7.3 两通道仿酉滤波器组的 Lattice 结构	192
7.8 线性相位准确重建两通道滤波器组	197
7.8.1 两通道滤波器组中的制约关系	197
7.8.2 由谱分解求 $H_0(z), H_1(z)$	199
7.8.3 Lattice 实现	201
7.9 树状滤波器组	205
第8章 M 通道滤波器组	207
8.1 M 通道滤波器组中的基本关系	207
8.2 M 通道滤波器组的多相结构	210
8.3 混叠抵消和 PR 条件的多相表示	212
8.4 M 通道滤波器组的设计	216
8.5 复数调制滤波器组	219
8.5.1 DFT 滤波器组	219
8.5.2 DFT 的滤波器组解释	222
8.5.3 DFT 滤波器组的多相结构	224

8.6 余弦调制滤波器组	225
8.7 余弦调制滤波器组准确重建的条件	232

第3篇 小波变换

第9章 小波变换基础	239
9.1 小波变换的定义	239
9.2 小波变换的特点	241
9.3 连续小波变换的计算性质	245
9.4 小波反变换及小波容许条件	249
9.5 重建核与重建核方程	250
9.6 小波的分类	251
9.6.1 经典类小波	252
9.6.2 正交小波	255
9.6.3 双正交小波	258
9.7 连续小波变换的计算	259
9.8 尺度离散化的小波变换及小波标架	261
9.8.1 尺度离散化的小波变换	262
9.8.2 离散栅格上的小波变换	264
9.8.3 小波标架理论介绍	266
第10章 离散小波变换的多分辨率分析	271
10.1 多分辨率分析的引入	271
10.1.1 信号的分解近似	271
10.1.2 树结构理想滤波器组	276
10.2 多分辨率分析的定义	278
10.3 空间 V_j, W_j 中信号的分解	282
10.4 二尺度差分方程	284
10.5 二尺度差分方程与共轭正交滤波器组	288
10.6 Mallat 算法	292
10.7 Mallat 算法的实现	296
10.8 小波变换小结	300

第 11 章 正交小波构造	303
11.1 正交小波概述	303
11.2 由 $h_0(n)$ 递推求解 $\phi(t)$ 的方法	306
11.3 消失矩、规则性及支撑范围	309
11.4 Daubechies 正交小波构造	313
11.5 接近于对称的正交小波及 Coiflet 小波	320
第 12 章 双正交小波、小波包及小波提升方案	325
12.1 双正交滤波器组	325
12.2 双正交小波	329
12.3 双正交小波的构造	333
12.4 双正交样条小波	336
12.5 正交小波包	347
12.6 小波提升方案	358
12.6.1 小波提升方案的背景	358
12.6.2 小波提升方案的基本原理	359
12.6.3 正交和双正交小波变换分解为小波提升方案	363
12.6.4 小波提升方案的应用	369
第 13 章 基于小波变换的信号奇异性检测及去噪	371
13.1 信号的奇异性检测	371
13.1.1 Lipschitz 指数	372
13.1.2 傅里叶变换与信号的规则性	375
13.1.3 小波变换与信号的奇异性	377
13.2 基于小波变换的信号奇异性检测	381
13.2.1 小波变换与信号的李氏指数	381
13.2.2 小波变换的模极大值	384
13.3 由小波变换的模极大值重建信号	390
13.3.1 小波变换的奇异点及信号的重建	390
13.3.2 由小波变换模极大值重建信号的思路	391
13.3.3 由小波变换模极大值重建信号的交替投影算法	393
13.4 小波去噪	397
13.4.1 小波去噪的原理	397
13.4.2 小波阈值施加的方式	399

13.4.3 小波阈值估计的思路.....	400
13.4.4 MATLAB 中的小波阈值	402
附录 关于所附光盘的说明.....	406
索引.....	407
参考文献.....	411



第1篇

时频分析



- 第1章 信号分析基础
- 第2章 短时傅里叶变换与 Gabor 变换
- 第3章 Wigner 分布
- 第4章 Cohen 类时频分布

第 1 章

信号分析基础

1.1 信号的时间与频率

我们生活在一个飞速发展的信息社会里,而信息的载体就是本书要讨论的主题——信号。在我们身边以及在我们的身上,信号是无处不在的。如,人们随时可以听到的语音信号,随时可以看到的视频图像信号,伴随着生命始终存在着心电、脑电、心音、脉搏、血压、呼吸等众多的生理信号。

对一个给定的信号 $x(t)$, 可以用很多方法来描述它。例如, 一个函数表达式, 一个数据序列, 甚至一个简单的图表, 这些都是信号的时域表示。众所周知, 通过傅里叶变换可以得到 $x(t)$ 的频谱, 即 $X(j\Omega)$, 进一步, 由 $X(j\Omega)$ 也可简单地得到 $x(t)$ 的能量谱或功率谱, 这些属于信号的频域表示。因此, 时间和频率是描述信号的两个最基本的物理量。时间和频率与日常生活的关系也极为密切, 人们时时可以感受到它们的存在。时间自不必说, 对频率, 如夕阳西下时多变的彩霞, 音乐会上那优美动听的旋律以及在一片寂静中突然冒出一声刺耳的尖叫等, 这些都包含了丰富的频率内容。

信号是变化着的, 变化着的信号构成了五彩斑斓的世界。此处所说的变化, 一是指信号的幅度随时间变化, 二是指信号的频率随时间变化。幅度不变的信号是直流信号, 而频率不变的信号是由单频率信号, 或多频率信号所组成的信号, 如正弦波、方波、三角波等。不论是直流信号还是正弦类信号, 都只携带着最简单的信息。

傅里叶于 1807 年提出了傅里叶级数的概念, 即任一周期信号可分解为复正弦信号的叠加。1822 年, 傅里叶又提出了非周期信号分解的概念, 这就是傅里叶变换。给定信号 $x(t)$, 如果它满足^[ZW2]

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt < \infty \quad (1.1.1)$$

那么, 可对其进行傅里叶变换。能量有限信号的傅里叶正、反变换如下:

$$X(j\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\Omega t} dt \quad (1.1.2a)$$