



北京高等教育精品教材
BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

研究生教学用书
教育部研究生工作办公室推荐

现代信号处理教程

(第二版)

胡广书 编著



清华大学出版社

现代信号处理教程

(第二版)

胡广书 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书共5篇,前4篇是“时频分析”、“滤波器组”、“小波变换”和“Hilbert-Huang变换”,这是既相互独立、又有着密切联系的四大块内容,而且是现代信号处理中的重要内容。它们主要针对的是非平稳信号的分析与处理,而 Hilbert-Huang 变换不但针对非平稳信号,而且特别用于非线性信号的分析与处理。

本书的第5篇是近十年来新发展起来的“压缩感知”理论。压缩感知以其丰富的理论内容和巨大的应用前景获得了众多学科的关注,目前正在迅速发展。

因此,从内容上看,本书定位于研究生数字信号处理提高课的教材。

本书内容丰富,涵盖了现代信号处理的主要知识体系。在编写中,笔者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些知识体系的主要内容。

清华大学出版社网站上本书链接下有100多个用MATLAB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。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

现代信号处理教程/胡广书编著. --2版. --北京:清华大学出版社,2015

ISBN 978-7-302-38934-7

I. ①现… II. ①胡… III. ①信号处理—教材 IV. ①TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第005685号

责任编辑:王一玲

封面设计:傅瑞学

责任校对:时翠兰

责任印制:杨 艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印装者:清华大学印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm

印 张:36.75

字 数:751千字

版 次:2004年11月第1版

2015年3月第2版

印 次:2015年3月第1次印刷

印 数:1~2500

定 价:65.00元

产品编号:062693-01

前言

00100101010110010011001001111101010010010101001001001010100100101010101



本书是为了配合清华大学研究生公共课“随机信号的统计处理”的教学而编写的。“随机信号的统计处理”课程开设于1979年。随着时间的推移和信号处理理论的发展,本书讲授的内容也从初期的以随机信号的分析为主逐渐过渡到现在的以现代信号处理的内容为主。

数字信号处理的理论非常丰富,且近几十年内一直在飞速发展,在众多的领域都获得了广泛的应用。笔者认为,数字信号处理的理论总体上可以分为三大部分,即经典数字信号处理(classical digital signal processing)、统计(statistical)数字信号处理和现代(modern,或advanced)数字信号处理。经典数字信号处理包括离散信号和离散系统分析、Z变换、DFT、FFT、IIR和FIR滤波器设计、有限字长问题及数字信号处理的硬件实现等。其研究对象是确定性信号和线性移不变系统。经典的内容自然是重要的和相对成熟的。统计数字信号处理研究的对象主要是平稳随机信号。因为我们在自然界所遇到的信号基本上都是随机的,所以研究随机信号的分析 and 处理是非常重要的。对这一类信号研究的方法主要是统计的方法或“估计”的方法,其内容包括随机信号的描述、平稳随机信号的定义和性质、自相关函数估计、经典功率谱估计和现代功率谱估计,维纳滤波和自适应滤波等。笔者将上述两部分内容包含在了拙著《数字信号处理——理论、算法与实现》(第三版,清华大学出版社,2012)一书中。

现代数字信号处理的“现代”一词比较模糊,理论上说应该是新内容,但在不同的教科书上赋予了不同的内容。例如,统计数字信号处理中的基于参数模型的功率谱估计又称为“现代功率谱估计”,维纳滤波器和自适应滤波器又称为“现代滤波器”。本书称为《现代信号处理教程》,内容自然是现代信号处理的内容。本书内容共分为5篇,前4篇是“时频分析”、“滤波器组”、“小波变换”和“Hilbert-Huang变换”,这是既相互独立又密切联系的四大块内容,它们主要针对的是非平稳信号的分析与处理,而Hilbert-Huang变换不但针对非平稳信号,还特别用于非线性信号的分析与处理。这4篇内容发展的动力是作为信号分析与处理基本工具的傅里叶变换所存在的不足,即缺乏时频定位功能、对非平稳信号不适用和在分辨率方面缺乏自适应性,而实际的物理信号往往是非平稳的,并且总是希望

能根据客观需要选取合适的时域和频域分辨率。

本书的第5篇是近十年来新发展起来的“压缩感知”理论,其发展的动力是经典的Shannon 抽样定理所需要的抽样频率过高以致数据量太大,而实际的物理信号在频域多是稀疏的这一客观事实,目的是发展新的抽样策略。压缩感知的理论正在迅速发展,吸引了众多学科的关注,并具有重大的理论和应用前景。

本书分为16章,前3篇各4章,后2篇各2章。

第1章虽然包含在第1篇内,但它实际上是全书所有章节的基础。本章首先讨论傅里叶变换的不足以及人们为改进这些不足所提出的各种方法。前已述及,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动力之一。在此基础上,本章还讨论信号的时宽和带宽、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。这些概念贯穿本书的始终。

第2章首先介绍短时傅里叶变换的概念与性质,然后介绍信号的Gabor展开及Gabor变换的计算。第3章较为详细地讨论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,给出时频分布统一表示的形式及各种分布性能的比较,最后介绍最优核设计的方法。

第2篇的“滤波器组”是“多抽样率信号处理”的主要内容。首先第5章详细讨论信号的抽取、插值、信号的多相表示、抽取与插值的实现等基本问题。第6章讨论滤波器组的基本概念,着重讨论半带滤波器及其实现,同时举例介绍抽取与插值的应用。第7章是本篇的重点,首先给出两通道滤波器组输入、输出在时域和频域的关系,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,第7章以较大的篇幅讨论它的特点、设计及Lattice结构等问题。第8章讨论 M 通道滤波器组,涉及输入输出的关系、准确重建的条件,特别强调的是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20世纪最后十多年中迅速发展并被广泛应用的信号处理的新理论,其内容十分丰富。限于篇幅,本篇只安排了4章。第9章介绍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了起来;另一方面使读者能较为全面地理解为什么说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、双正交小波的构造问题,并介绍小波包的概念。

作为小波变换的应用,同时也是进一步介绍小波变换的理论,第12章介绍了两部分内容,一部分是小波变换在信号奇异性检测中的应用问题;另一部分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。

时频联合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,它改进了傅里叶变换所缺少的定位功能;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。滤波器组是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,它有其独立的应用背景,同时也是实现小波变换的主要工具。

第4篇的 Hilbert-Huang 变换是从1998年起新发展起来的内容,它不但适用于非平稳信号,而且更注重非线性信号。第13章讨论 Hilbert-Huang 变换的基础理论,如经验模式分解和 Hilbert 谱分析。第14章讨论 Hilbert-Huang 变换的新进展和应用。这些新进展包括归一化 Hilbert-Huang 变换和集总经验模式分解。从第4篇的内容看,它是时频联合分析的继续和发展。

因此本书前4篇的内容既相对独立,同时又有着密切的关系,都是力图将描述信号的两个最重要的物理量,即时间和频率联合起来对信号进行分析和处理。

第5篇的压缩感知由于其丰富的理论内容和巨大的应用前景被誉为信号处理中的“next big idea”。第15章较为全面和深入地介绍压缩感知的基础理论,第16章集中讨论新提出的抽样策略,即模拟/信息转换,然后简单介绍压缩感知的应用。

本书内容丰富,涵盖了现代信号处理的主要知识体系。在编写中,笔者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5个知识体系的主要内容。

清华大学出版社网站上本书链接下有100多个用 MATLAB 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。

本书第一版自2004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的热情关心,他们对本书提出了许多非常好的建议。2005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”,2006年本书被评为“北京市高等学校精品教材”。在此,向广大的读者及使用本书的老师表示衷心的感谢!并感谢相关主管部门的支持和肯定。

清华大学张旭东教授对本书的整体布局提出了很好的建议,在此向张教授表示衷心的感谢!

笔者的学生梁文轩同学(目前正在美国约翰·霍普金斯大学攻读博士学位)仔细审阅了本书第5篇的压缩感知两章,提出了一系列的建议和修改意见。在此向文轩表示特别的感谢!

张辉、汪梦蝶、许燕、黄惠芳、朱莉、黄悦、耿新玲、冯云、李玥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

2014 年 10 月于清华大学

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

001001010101100100110010011110101001011010100101001001010101010



$\delta(t), \delta(n)$	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
x, 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
R^N	N 维 Euclidean 空间
$L^2(R)$	有限能量信号(函数)的空间
$[N]$	不超过 N 的自然数的集合, 即 $\{1, 2, \dots, N\}$

目 录

00100101010110010011001001111010100100111001010010010100101



常用符号一览表	XIII
---------------	------

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	最优核函数设计	114
4.6.1	减少交叉项干扰的核的设计	114
4.6.2	决定于信号的最优核的设计	118
4.6.3	自适应最优核的设计	119
4.7	有关时频联合分析的 MATLAB 软件	121
第 2 篇 滤波器组		
第 5 章	信号的抽取与插值	125
5.1	引言	125
5.2	信号的抽取	126
5.3	信号的插值	131
5.4	抽取与插值相结合的抽样率转换	133
5.5	信号的多相表示	136
5.6	多抽样率系统中的几个恒等关系	138
5.7	抽取和插值的滤波器实现	141
5.7.1	抽取的滤波器实现	141
5.7.2	插值的滤波器实现	143
5.7.3	抽取和插值相结合的滤波器实现	143
第 6 章	滤波器组基础	146
6.1	滤波器组的基本概念	146

6.2	滤波器组的种类及有关的滤波器	149
6.2.1	最大均匀抽取滤波器组	149
6.2.2	正交镜像滤波器组	150
6.2.3	第 M 带滤波器	151
6.2.4	半带滤波器	153
6.2.5	互补型滤波器	155
6.3	半带滤波器设计	158
6.4	多抽样率系统的应用简介	160
第 7 章	两通道滤波器组	165
7.1	两通道滤波器组中各信号的关系	165
7.2	$G_0(z)$ 和 $G_1(z)$ 的选择	167
7.3	标准正交镜像滤波器组	170
7.3.1	标准正交镜像滤波器组中的基本关系	170
7.3.2	FIR 标准正交镜像滤波器组	173
7.4	共轭正交镜像滤波器组	175
7.5	共轭正交镜像滤波器的设计	179
7.6	仿酉滤波器组	183
7.7	两通道仿酉滤波器组的 Lattice 结构	187
7.7.1	FIR 系统的 Lattice 结构	187
7.7.2	功率互补 FIR 系统的 Lattice 结构	188
7.7.3	两通道仿酉滤波器组的 Lattice 结构	191
7.8	线性相位准确重建两通道滤波器组	195
7.8.1	两通道滤波器组中的制约关系	195
7.8.2	由谱分解求 $H_0(z), H_1(z)$	198
7.8.3	Lattice 实现	200
7.9	树状滤波器组	203
第 8 章	M 通道滤波器组	206
8.1	M 通道滤波器组中的基本关系	206
8.2	M 通道滤波器组的多相结构	209
8.3	混叠抵消和 PR 条件的多相表示	211
8.4	M 通道滤波器组的设计	215
8.5	复数调制滤波器组	218

8.5.1 DFT 滤波器组	218
8.5.2 DFT 的滤波器组解释	221
8.5.3 DFT 滤波器组的多相结构	223
8.6 余弦调制滤波器组	224
8.7 余弦调制滤波器组准确重建的条件	231

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、双正交小波构造及正交小波包	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
11.6	双正交滤波器组	324
11.7	基于双正交小波的多分辨率分析	327
11.8	双正交小波的构造	330
11.9	双正交样条小波	333
11.10	正交小波包	343
第 12 章	基于小波变换的信号奇异性检测及去噪	355
12.1	信号的奇异性检测	355
12.1.1	Lipschitz 指数	356
12.1.2	傅里叶变换与信号的规则性	359
12.1.3	小波变换与信号的奇异性	361
12.2	基于小波变换的信号奇异性检测	365
12.2.1	小波变换与信号的李氏指数	365
12.2.2	小波变换的模极大值	368
12.3	由小波变换的模极大值重建信号	374
12.3.1	小波变换的奇异点及信号的重建	374
12.3.2	由小波变换模极大值重建信号的思路	375
12.3.3	由小波变换模极大值重建信号的交替投影算法	377
12.4	小波去噪	380
12.4.1	小波去噪的原理	381
12.4.2	小波阈值施加的方式	383
12.4.3	小波阈值估计的思路	384
12.4.4	MATLAB 中的小波阈值	386

第4篇 Hilbert-Huang 变换

第13章 Hilbert-Huang 变换基础	393
13.1 非平稳和非线性信号	394
13.2 已有非平稳信号分析方法简述	397
13.3 关于瞬时频率的进一步讨论	398
13.3.1 瞬时频率的发展过程	399
13.3.2 解析信号用于瞬时频率的限制	402
13.3.3 瞬时频率的估计	404
13.4 经验模式分解	405
13.4.1 固有模态函数	405
13.4.2 经验模式分解过程	406
13.4.3 迭代的停止准则	409
13.4.4 迭代过程中数据端点的处理	410
13.4.5 EMD 的特点	412
13.5 Hilbert 谱分析	413
第14章 Hilbert-Huang 变换的新进展及应用	418
14.1 归一化 HHT	418
14.2 集总经验模式分解	420
14.2.1 白噪声的 EMD 特征	420
14.2.2 模式混合	422
14.2.3 集总经验模式分解的步骤和理论依据	424
14.2.4 互补集总经验模式分解	428
14.3 HHT 的应用	430
14.4 关于 HHT 的几点讨论	433

第5篇 压缩感知

第15章 压缩感知的基础理论	439
15.1 压缩感知的基本概念	439
15.2 预备知识	447
15.2.1 矩阵的零空间	447

15.2.2	矩阵的 spark	450
15.2.3	向量的范数	452
15.2.4	凸优化与线性规划的基本概念	455
15.3	信号的稀疏表示	459
15.3.1	稀疏信号及可压缩信号	459
15.3.2	信号稀疏表示的基本方法	461
15.3.3	信号的变换及字典设计	464
15.4	测量矩阵需要满足的性质	467
15.4.1	测量矩阵的约束等距性质	468
15.4.2	测量矩阵的相干性	471
15.4.3	P_0 解唯一性的条件	474
15.4.4	P_1 解唯一性的条件	476
15.4.5	P_0 解和 P_1 解等效的条件	478
15.4.6	测量边界	480
15.4.7	关于 P_1 解唯一性的进一步说明	482
15.5	可压缩信号的恢复	484
15.6	噪声情况下的信号恢复	491
15.7	测量矩阵的构造	494
15.7.1	Johnson-Lindenstrauss 引理和浓缩测量的基本概念	494
15.7.2	随机测量矩阵	495
15.7.3	部分随机傅里叶矩阵	497
15.7.4	确定性测量矩阵	498
15.8	稀疏信号恢复算法	499
15.8.1	基追踪	499
15.8.2	同伦算法	501
15.8.3	贪婪算法	507
第 16 章	模拟/信息转换及压缩感知的应用	514
16.1	Shannon 抽样定理及其扩展	514
16.1.1	带通信号的抽样	515
16.1.2	基于解调的多带信号抽样	516
16.1.3	多通道抽样	517
16.1.4	周期非均匀抽样	519
16.2	模拟/信息转换的基本概念	523

16.3	基于随机解调的模拟/信息转换方案	525
16.3.1	$p_c(t)$ 的作用	526
16.3.2	RD 抽样系统的时域分析	527
16.3.3	RD 抽样系统的硬件实现	530
16.3.4	RD 抽样系统的性能仿真	531
16.4	基于调制宽带转换器的模拟/信息转换方案	532
16.4.1	调制宽带转换器的信号模型	532
16.4.2	MWC 的系统组成	533
16.4.3	MWC 抽样系统的频域分析	534
16.4.4	MWC 抽样系统中参数的选择	538
16.4.5	MWC 抽样系统的信号重建	539
16.5	基于 Xampling 的模拟/信息转换方案简介	541
16.6	压缩感知的应用	544
16.6.1	单像素相机	545
16.6.2	数据分离	548
附录	关于所附 MATLAB 程序的说明	549
索引		550
参考文献		555