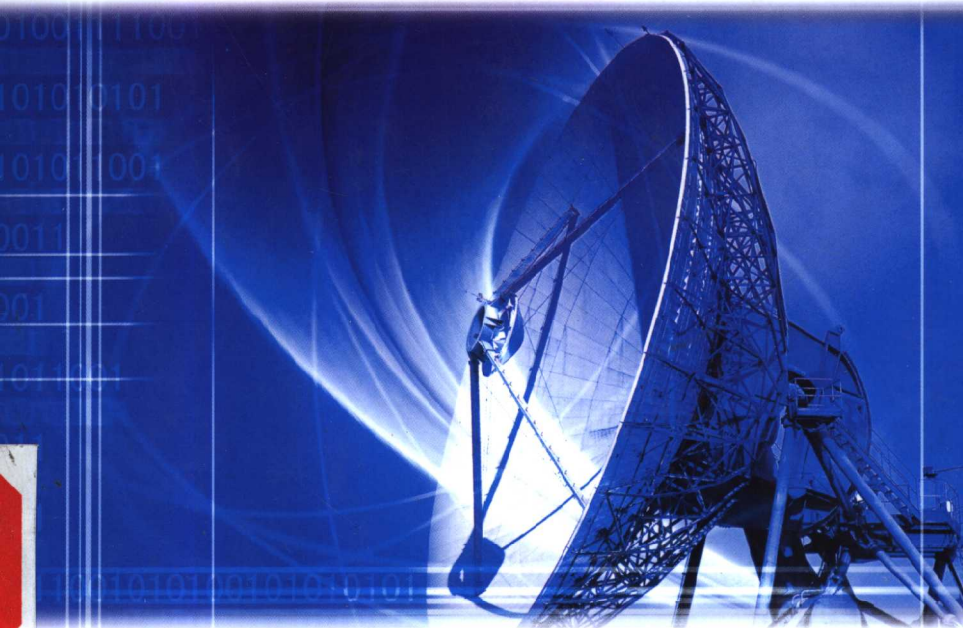


Synthesis and Unification Method in Correlation Theory of Signal Processing

信号处理相关理论 综合与统一法

王宏禹 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

信号处理
相关理论综合与统一法
Synthesis and Unification Method
in Correlation Theory of Signal Processing

王宏禹 著

国防工业出版社

·北京

图书在版编目(CIP)数据

信号处理相关理论综合与统一法/王宏禹著. —北京:
国防工业出版社, 2005. 9

ISBN 7-118-03936-5

I. 信... II. 王... III. 信号处理-研究
IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 057905 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13¼ 328 千字

2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月北京第 1 次印刷

印数:1—2500 册 定价:40.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 68428422

发行邮购:(010) 68414474

发行传真:(010) 68411535

发行业务:(010) 68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾 问 黄 宁

主 任 委 员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘 书 长 张又栋

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镛

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓名笔画排序) 刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 韩祖南 舒长胜

前 言

人类已进入信息社会与知识经济时代,信息科学技术迅速发展并广泛应用于各领域。信号处理是信息科学的重要组成部分,深受国内外重视并进行深层次探索。现代信号处理的发展可以用一个“非”字概括,即向非线性、非高斯(Gauss)与非平稳信号处理发展。自适应信号处理是信号处理的一个重要分支,自20世纪60年代初提出以来,对其研究一直长盛不衰,不断向纵深发展。现在非平稳信号处理与自适应信号处理两者结合越来越紧密,为实现智能化信息处理,创造了美好的应用前景。

事物的发展总是从特殊到一般,再到特殊,即从特定的事物出发,逐渐找到共同的规律,指导新的实践。信号处理技术根据不同的目标,产生不同分支的技术,而不同分支技术之间可能有联系,存在相关与相似之处,综合起来分析其异同,统一共性,可以揭示更本质的规律,并可以更深刻地理解各分支的理论。因此,对信号处理中各分支相关理论进行综合与统一方法研究,是很有意义的。

信号处理技术发展到目前,内容非常丰富,其各分支间相关理论有许多待解决的综合与统一方法问题,本书只能就一些重要的基本理论与国际最新学术发展前沿问题进行研究,共包括以下6个(前3个为重要基本理论问题,后3个为最新学术发展前沿)方面。

1) 长球面波函数与卡-洛(Karhuen-Loève,即K-L)变换

长球面波函数是信号处理中常用的一种重要函数,有微分方程与积分方程2种描述方式,需要从理论上将它们统一起来。在确定性信号分解展开中,将其作为基函数已有许多研究,现将其用于平稳随机信号分解展开中的基函数,把长球面波函数与卡-洛

展开及变换联系起来研究,可以得出最大能量卡-洛展开与变换。

2) 信号与系统的离散化、连续化

信号欲数字处理,首先要进行取样离散化。信号取样分为低通带限取样、带通带限取样、非带限取样、均匀取样、非均匀取样及广义取样等,需对其进行综合与统一研究。信号通过线性系统通常用差分方程来描述,差分方程有常系数的、时变系数的、常系数随机的与时变系数随机的,需要研究它们统一求解的方法。实际应用中常需将线性离散系统信号模型转换成为等效的连续系统信号模型,但用通常转换方法所求得描述它们的差分方程与微分方程,存在相应系数不一致的问题,故需要进一步研究使两者相一致的转换方法。

3) 随机信号白化

在信号处理中常需将随机信号或有色噪声白化为白噪声。白噪声分为平稳的与非平稳的、正态的与非正态的及近似不相关的近似白噪声。目前对随机信号白化理论方法虽分散地有些研究,但却缺乏综合统一研究,包括涉及随机信号通过系统变化规律的问题。信息是用熵来度量的,故应研究信息熵通过线性系统与非线性系统变化的规律。随着人工神经网络理论与应用的发展,也需要深入探索信息熵通过系统变化的规律。

4) 时频分析

近年来,国内外对自适应时频分析研究非常重视,出现了自适应核函数、自适应戈勃(Gabor)展开、自适应旋转投影分解法及自适应小波神经网络等自适应时频分析法,因此,需及时将它们综合系统化。自适应小波神经网络具有一定的优越性,方法比较简单灵活,可以代替自适应戈勃展开,并可用于非平稳信号时变参数模型的自适应实现。通过对自适应小波神经网络研究,可以将自适应时频分析一些理论方法统一起来。

通常的时频分析是基于傅里叶变换(即傅氏变换)的,如短时傅氏变换、维格纳分布(Wigner Distribution,即WD)与模糊函数等,其不足之处是对于多信号叠加时,存在交叉项干扰及对非线性

时变频率检测与估计产生困难。分数阶傅氏变换是广义傅氏变换,它与一些通常的时频分析的关系已有研究,但如何将其发展成为基于分数阶傅氏变换的时频分析,即广义时频分析,以克服通常时频分析的不足,是非常必要的。

5) 局域波分解

非平稳与非平稳随机信号的主要特征是时变性。它们的频率是时变的,仅仅在某一局部时间内存在,所以将这类信号称为局域波。局域波分解法是一种新的时频分析法,它是基于信号局部特征的。这种方法是由诺尔顿·黄(Norden E. Huang)等人于1998年提出而发展起来的,应用广泛,受到国内外越来越多的重视。

6) 非平稳随机信号谱估计

将非平稳随机信号与平稳随机信号在理论方法上统一起来,一直为人们所重视,并不断得到发展与完善。近年来,在非平稳随机信号进化谱估计与周期平稳随机信号的循环谱估计方面,推广应用平稳随机信号的现代谱估计方法(如最大似然法与最大熵谱法),取得了进展,并特别适用于短数据情况。对这方面的研究,是很有发展前途的。

根据上述内容,将全书分为9章,分别予以论述。各章依次为:长球面波函数描述理论统一及其为基的卡-洛变换;信号取样的理论与统一法;线性离散系统差分方程求解的统一法与离散模型的连续化;随机信号的白化理论及通过系统的变化规律;自适应时频分析;时频分析的局域波分解法;广义时频分析;非平稳随机信号的数据-自适应进化谱估计及周期平稳随机信号的现代谱估计法与自适应处理。

本书除了反映信号处理一些重要的基本理论与国际学术新发展的前沿问题外,还包含了作者许多研究成果。希望本书对读者有所裨益,对信号处理相关理论的综合与统一方法研究能有启发与推动作用。

国家自然科学基金委员会资助了我们“广义时频分析与广义正态分布随机信号处理理论与应用”研究项目,本书包含了此研

究项目的成果,感谢国家自然科学基金委员会的资助与支持。

清华大学李衍达教授、院士与东南大学何振亚教授热情推荐本书申请国防科技图书出版基金资助,并提出许多宝贵意见,特向他们致以衷心的感谢。

大连理工大学邱天爽教授审阅了本书书稿,提出许多宝贵改进意见;陈喆博士热情提供一些资料,并协助做了大量具体工作;大连舰艇学院张海勇与盖强博士热情提供了局域波分解方面资料;大连理工大学林相波、李婷与张金凤研究生为本书绘制了大量插图,在此一并向他(她)们表示深切的谢意。

信号处理理论与技术发展非常迅速,将其相关与相似理论进行综合与统一,是有难度的,而作者水平有限,书中难免存在缺点、错误与不足之处,恳请读者批评指正,不胜感激。

王宏禹

2005年5月于大连理工大学

目 录

第 1 章 长球面波函数描述理论统一及以其为基的 卡-洛变换	1
1.1 有关数学理论	1
1.1.1 斯图谟-刘维尔(Sturm-Liouville)型微分方程	1
1.1.2 第二类弗雷德霍姆(Fr)积分方程	3
1.1.3 积分方程与微分方程之间的关系	4
1.2 长球面波函数的微分方程	6
1.3 长球面波函数微分方程与积分方程理论上的统一	7
1.3.1 长球面波函数微分方程与斯-刘型微分方程 的关系	7
1.3.2 与长球面波函数微分方程等价的积分方程	8
1.3.3 积分变换的正交不变性	8
1.3.4 满足式(1-28)与式(1-30)要求的核函数	9
1.3.5 研究结果	10
1.4 长球面波函数与最佳波形设计	12
1.4.1 由最佳波形设计导出的长球面波函数的 积分方程	12
1.4.2 带限函数的极值	16
1.4.3 由最佳波形设计导出的长球面波函数积分方程 的特征	19
1.5 以长球面波函数为基的卡-洛展开与变换	19
1.5.1 卡-洛展开与变换	20
1.5.2 以长球面波函数为基的卡-洛展开	24
1.5.3 以长球面波函数为基的卡-洛变换	25

第 2 章 信号取样的理论与统一法	28
2.1 带限信号与信号取样表示	29
2.1.1 带限信号	29
2.1.2 信号取样表示	31
2.2 研究信号取样的内插法	35
2.2.1 内插多项式法	35
2.2.2 内插滤波器法	37
2.2.3 2 种内插法之间的关系	40
2.3 研究低通带限信号取样的系统输入 - 输出 关系式	40
2.3.1 式(2-39)的证明	41
2.3.2 式(2-42)的证明	42
2.4 经典取样定理	44
2.4.1 用线性系统输入 - 输出关系式研究	45
2.4.2 用双边对称的拉格朗日内插多项式研究	45
2.4.3 裁剪误差	49
2.5 广义取样展开式	50
2.6 一类非带限信号的取样理论	55
2.6.1 指数函数和非带限信号	55
2.6.2 研究非带限信号取样的内插多项式法	56
2.7 信号的非均匀取样	59
2.7.1 时域内插法	59
2.7.2 频域内插滤波器重构法	63
2.7.3 与广义取样的关系	66
2.8 带通带限信号的取样	68
2.8.1 窄带信号的均匀取样	69
2.8.2 带通带限信号的均匀取样	74
2.8.3 带通带限信号的非均匀取样	78
2.8.4 与非带限信号取样的关系	83
2.9 平稳随机信号的取样	83

第3章 线性离散系统差分方程求解的统一法与离散模型的连续化	86
3.1 E变换概念与性质	87
3.1.1 E变换定义	87
3.1.2 E变换的性质	88
3.1.3 E逆变换	92
3.1.4 E变换表	93
3.1.5 与Z变换的关系	95
3.2 E变换法求解差分方程	96
3.2.1 求解线性常系数差分方程	96
3.2.2 求解齐次线性时变系数差分方程	98
3.2.3 求解非齐次线性时变系数差分方程	99
3.3 求解线性离散系统差分方程的统一法	101
3.3.1 求解线性常系数差分方程法	101
3.3.2 求解线性时变系数差分方程法	104
3.3.3 求解线性常系数随机差分方程法	107
3.3.4 求解线性时变系数随机差分方程法	110
3.4 应用E变换研究随机信号离散模型的连续化	114
3.4.1 应用E变换研究平稳随机信号离散模型的连续化	114
3.4.2 E变换法用于非平稳随机信号离散模型与连续模型等效转换的探讨	119
第4章 随机信号的白化理论及通过系统的变化规律	123
4.1 马尔可夫序列与广义马尔可夫序列	124
4.1.1 马尔可夫序列	124
4.1.2 广义马尔可夫序列	124
4.2 广义马尔可夫矢量序列与随机信号的白化	127
4.2.1 广义马尔可夫矢量序列	127
4.2.2 广义马尔可夫随机信号的白化	130
4.3 随机信号模型的马尔可夫性	133

4.3.1	状态方程的马尔可夫性	133
4.3.2	平稳随机信号模型的正态马尔可夫性	134
4.3.3	非平稳随机信号模型的马尔可夫性	138
4.4	随机信号模型与相关统计量的关系	139
4.4.1	随机信号模型与功率谱的关系	139
4.4.2	随机信号模型与自相关函数的关系	145
4.5	熵与偏态简介	151
4.5.1	熵简介	151
4.5.2	偏态简介	153
4.6	最小熵解卷积	155
4.6.1	威津斯最小熵解卷积原理	156
4.6.2	威津斯最小熵准则与标准累积量的关系	158
4.6.3	威津斯最小熵解卷积中输入序列分布的讨论	159
4.7	随机信号熵通过系统的变化规律	161
4.7.1	带限正态白噪声通过线性因果最小相位 系统时熵的变化	162
4.7.2	非正态 K 阶白噪声通过线性因果非最小相位 系统时熵的变化	163
4.8	信号通过人工神经网络熵的变化与应用例	164
4.8.1	信号通过人工神经网络熵的变化	164
4.8.2	在研究人工神经网络泛化能力中的应用	166
4.9	随机信号近似白化法	168
4.9.1	随机信号变换域近似白化法简介	169
4.9.2	序列乱序近似白化算法	169
第5章	自适应时频分析	173
5.1	自适应核时频表示	174
5.1.1	Cohen 类双线性时频分布	174
5.1.2	自适应核时频表示求解法	175
5.1.3	ARBK 时频分布	177
5.2	自适应戈勃展开	183

5.2.1	戈勃展开简介	183
5.2.2	自适应高斯基表示(AGR)	185
5.3	自适应旋转投影分解法	190
5.3.1	自适应旋转投影分解法原理	190
5.3.2	自适应旋转投影分解谱图	191
5.3.3	自适应旋转投影分解法性能	192
5.4	自适应小波神经网络	193
5.4.1	自适应小波神经网络基本原理	193
5.4.2	由 Molet 小波基构成的自适应小波神经网络 ...	195
5.4.3	随机梯度算法中子小波参数 a 与 b 初值的 选择	198
5.4.4	仿真实验	199
5.5	自适应小波神经网络在求解时变 参数信号模型中的应用	201
5.5.1	基于小波神经网络的时变参数信号模型	202
5.5.2	求解 TVAR 信号模型的小波神经网络的 自适应算法	203
5.5.3	仿真实验	204
第 6 章	时频分析的局域波分解法	208
6.1	瞬时频率	209
6.2	内蕴模式函数与局域波分解法原理	213
6.2.1	内蕴模式函数	213
6.2.2	局域波分解法原理	215
6.3	局域波分解法	217
6.3.1	EMD 法	217
6.3.2	ATVFD 法	221
6.3.3	EMMD 法	222
6.3.4	3 种分解方法性能比较	225
6.3.5	消除边界效应的方法	229
6.4	希尔伯特谱	230

6.4.1	内蕴模式函数分量的希尔伯特变换与 自适应基	231
6.4.2	希尔伯特时频谱与边缘谱	232
6.5	内蕴模式函数分量正交性的讨论	234
6.6	局域波分解法在非平稳信号处理中的应用	235
6.6.1	在维格纳分布中的应用	236
6.6.2	方差平稳随机信号趋势项提取法	237
6.6.3	局域波分解法与方差平稳随机信号趋势项 提取法的关系	244
6.7	局域波分解法在非线性系统分析中的应用	246
6.7.1	在迪尤芬(Duffing)方程解分析中的应用	246
6.7.2	在斯托克斯(Stokes)波分析中的应用	248
6.7.3	在故障诊断中的应用	251
第7章	广义时频分析	255
7.1	分数阶傅氏变换基本理论	256
7.1.1	定义与物理意义	256
7.1.2	一些重要性质	259
7.1.3	一些常见信号的分数阶傅氏变换	259
7.1.4	应用例	262
7.2	分数阶傅氏变换坐标平面中的坐标旋转 变换时频分布	264
7.2.1	坐标旋转变换的短时傅氏变换	264
7.2.2	坐标旋转变换的维格纳分布	266
7.2.3	坐标旋转变换时频分布的旋转不变性	266
7.3	分数阶域时频分析	267
7.3.1	分数阶域	268
7.3.2	分数阶域短时傅氏变换	268
7.3.3	分数阶傅氏变换矩	270
7.3.4	短时傅氏变换与维格纳分布一些类型的关系 ..	271
7.3.5	加权的伪维格纳分布	275

7.3.6	分数阶域加权的伪维格纳分布	276
7.4	时频分析中以 LFM 函数为核函数的积分变换	278
7.4.1	信号以 LFM 函数为核函数的积分变换	279
7.4.2	Chirplet 变换	279
7.4.3	Radon-Wigner 变换	281
7.4.4	Hough 变换与 Wigner-Hough 变换	285
7.5	基于分数阶傅氏变换核函数的二次时频分析	290
7.5.1	分数阶维格纳分布	290
7.5.2	分数阶 AF	293
7.6	分数阶倒谱与应用例	301
7.6.1	分数阶倒谱	301
7.6.2	应用例	302
第 8 章	非平稳随机信号的数据 - 自适应	
	进化谱估计	309
8.1	非平稳随机信号谱的频率概念	310
8.1.1	平稳随机信号的谱分解	310
8.1.2	非平稳随机信号的频率表示法	311
8.2	非平稳随机信号的进化谱理论	312
8.2.1	Priestley 进化谱	313
8.2.2	Wold-Cramer 进化谱	316
8.2.3	均匀调制的非平稳随机信号及其进化谱	318
8.3	平稳随机信号谱功率估计的最小方差法	321
8.3.1	最大似然滤波器分析法	321
8.3.2	最大似然法谱估计频率分辨率性能	324
8.4	数据 - 自适应谱估计器	328
8.4.1	频率 ω_0 处的信号模型	328
8.4.2	$A(n, \omega_0)$ 的估计	330
8.4.3	数据 - 自适应进化谱估计器	332
第 9 章	周期平稳随机信号的现代谱估计法与	
	自适应处理	338