

73.412

119

:2

DG45/13

非平稳随机信号 分析与处理

Nonstationary Random Signal Analysis and Processing

王宏禹 著

国防工业出版社

·北京·

4016626

图书在版编目(CIP)数据

非平稳随机信号分析与处理/王宏禹著. —北京: 国防工业出版社, 1999. 1

ISBN 7-118-01861-9

I. 非… II. 王… III. ①随机信号, 非平稳-信号分析②随机信号, 非平稳-信号处理 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 00312 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)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 12 $\frac{3}{8}$ 317 千字

1999 年 1 月第 1 版 1999 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1500 册 定价: 22.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

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,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. 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,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防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,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,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,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工业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 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员	怀国模			
主任委员	黄宁			
副主任委员	殷鹤龄	高景德	陈芳允	曾铎
秘书长	崔士义			
委员	于景元	王小谟	尤子平	冯允成
(以姓氏笔划为序)	刘仁	朱森元	朵英贤	宋家树
	杨星豪	吴有生	何庆芝	何国伟
	何新贵	张立同	张汝果	张均武
	张涵信	陈火旺	范学虹	柯有安
	侯正明	莫梧生	崔尔杰	

4016626

前 言

随机信号分为平稳的和非平稳的,其中平稳随机信号分析与处理已受到很大重视,并广泛应用于雷达、水声、通信、自动控制、机械振动、地震勘探及生物工程等许多工程领域,产生了明显的作用。但实际中的随机信号许多是非平稳的,长期以来囿于理论的发展,只好将它们简化为平稳随机问题来处理,其结果当然不甚满意。近年来,随着科学技术的发展和进步,国内外学术界已将注意力转向非平稳随机信号分析与处理研究上,其中一些分支,如信号的时频表示法(包括戈勃展开、小波变换、维格纳分布与广义双线性时频分布等,它们既可用于研究确定性时变信号,也可用于研究随机时变信号,即非平稳随机信号,并将这两种时变信号统称为非平稳信号)、时变参数信号模型法及周期性平稳随机信号分析等,已成为当前国内外学术界研究热点之一。

与80年代中期前相比,非平稳随机信号分析与处理的理论和方法得到了很大发展,内容丰富不少,但它仍处于方兴未艾发展之中,有很多问题待解决,其理论方法尚不够完备,还未形成统一与比较完整的分析及处理的理论系统。因此,目前要想比较完整、系统地阐述它确实不易,也未见到国内外对这方面比较全面介绍的书籍。本人根据非平稳随机信号分析与处理发展的现有情况,结合自己的教学经验和进行的科学研究,觉得就是做一些初步的系统化与条理化工作,尽快地反映此领域迅速发展的面貌及国内外所取得的最新研究成果,是很需要的,将会对提高与发展这方面起到促进作用。为此,写成此书做一尝试,希望能对从事非平稳随机信号分析与处理的科技人员与高等院校师生有所裨益。另外,本书与作者已出版的四本专著和教材,即《随机数字信号处理》(科学出版社,1988年)、《现代谱估计》(东南大学出版社,1991年)、《数字信号处理专论》(国防工业出版社,1995年)及《统计信号处理理论计

算与题解》(国防工业出版社,1996年),它们合在一起,可构成比较完整的随机与时变信号处理方面的系列书。

本书共十章,除第一章引论对全书内容做概述外,由以下三部分内容组成。

(1)信号的时频表示法,它也是研究非平稳随机信号分析与处理的非参数模型法,包括第二章的维格纳分布与广义双线性时频分布、第三章的短时傅里叶变换与分数阶傅里叶变换、第四章的戈勃展开及第五章的小波变换。

(2)非平稳随机信号分析与处理的参数模型法,包括第六章的自适应自回归(AR)谱分析法与分段平稳AR模型法及第七章的非平稳随机信号的时变参数模型法。

(3)非平稳随机信号分析与处理的一些专门问题,包括第八章的方差平稳随机信号、第九章的周期性平稳随机信号及第十章的非平稳随机信号的进化谱。

本书重点放在了解非平稳随机信号的各种分析与处理的理论方法及一些理论方法之间的关系,并尽量理论联系实际,阐明它们在工程实际中的应用。

国家自然科学基金资助了我们的“非平稳随机信号分析与处理”研究项目,本书是此研究项目的主要成果之一,衷心地感谢国家自然科学基金委员会的资助与支持。参加此项目研究工作的有博士生刘永红、王文华与王成毅,书中包括了 we 集体研究此项目的一些成果。这三位博士生为本书的编写提供了一些素材,并协助绘制了一些图稿。此外,第五章小波变换的前四节初稿是由王婷同志提供的。在此,对他们一并表示谢意。

本书的写作与出版,得到国防科委信息所莫悟生研究员的大力支持和提出许多宝贵意见。特在此向他致以深切的感谢。

本书涉及面广,难度大,而本人水平有限,书中不可避免有不少缺点和错误,恳请读者批评指正,不胜感激。

王宏禹

1998年2月于大连理工大学

目 录

第一章 引论

§ 1-1 信号的时频表示	1
§ 1-2 信号的不确定性原理	8
§ 1-3 非平稳随机信号的统计描述	12
§ 1-4 非平稳随机信号的时变谱	20
§ 1-5 可化为平稳随机情况处理的非平稳随机信号	26
参考文献	29

第二章 维格纳分布与广义双线性时频分布

§ 2-1 连续时间信号的维格纳分布	32
§ 2-2 离散时间信号的维格纳分布	38
§ 2-3 维格纳分布的计算	45
§ 2-4 维格纳分布与模糊函数的关系	50
§ 2-5 信号时频分布的统一表示	55
§ 2-6 一些常见的广义双线性时频分布	61
§ 2-7 自适应时频分布	71
§ 2-8 非平稳随机信号的维格纳—威利谱	77
§ 2-9 维格纳分布的应用例	79

附录 2-1 离散时间维格纳分布与连续时间维格纳 分布的关系	83
---	----

参考文献	85
------------	----

第三章 短时傅里叶变换与分数阶傅里叶变换

§ 3-1 连续短时傅里叶变换	87
§ 3-2 离散短时傅里叶变换	90
§ 3-3 短时傅里叶变换的递归算法	97
§ 3-4 短时功率谱	103

§ 3-5 分数阶傅里叶变换	112
§ 3-6 Chiplet 变换与频率一切变分布	122
参考文献	124
第四章 戈勃展开	126
§ 4-1 连续戈勃展开	127
§ 4-2 离散戈勃展开	131
§ 4-3 离散与连续戈勃展开之间的关系	135
§ 4-4 离散 Zak 变换(DZT)	142
§ 4-5 利用 DZT 求解离散戈勃展开	145
§ 4-6 有限离散戈勃展开的框架周期形式	148
§ 4-7 有限拟正交离散戈勃展开与无限序列离散 戈勃展开	155
§ 4-8 自适应戈勃表示	162
§ 4-9 戈勃展开的应用例	166
附录 4-1 $Sg_{p,q} = (Sg)_{p,q}$ 与 $S^{-1}g_{p,q} = (S^{-1}g)_{p,q}$ 的 证明	169
附录 4-2 矩阵 H 为满行秩时, 式(4-131)最优解 $\gamma_{opt} = H^T(HH^T)^{-1}v$ 的证明	170
参考文献	172
第五章 小波变换	174
§ 5-1 连续小波变换	175
§ 5-2 离散小波变换	186
§ 5-3 二进小波变换	189
§ 5-4 多分辨率分析	196
§ 5-5 小波变换的能量分布及与广义双线性时频 分布的关系	206
§ 5-6 小波变换在随机信号分析与处理中的应用	211
参考文献	218
第六章 自适应 AR 谱分析法与分段平稳 AR 模型法	220
§ 6-1 自适应 AR 谱分析法	220

§ 6-2 分段平稳 AR 模型法	230
参考文献	244
第七章 非平稳随机信号的时变参数模型法	245
§ 7-1 非平稳随机信号的时变 ARMA 参数模型 存在的条件	245
§ 7-2 模型时变参数估计方法	247
§ 7-3 AR 时变参数模型估计	249
§ 7-4 时变格型滤波器法	254
§ 7-5 普罗尼法	258
§ 7-6 MA 与 ARMA 时变参数模型估计	260
§ 7-7 非平稳随机信号时变参数模型与其 维格纳—威利谱的关系	265
参考文献	285
第八章 方差平稳随机信号——均值具有趋向性的 非平稳随机信号	287
§ 8-1 均值具有趋向性的非平稳随机信号产生的 分析	288
§ 8-2 趋势项剔除法	293
§ 8-3 趋势项提取法	306
参考文献	313
第九章 周期性平稳随机信号	314
§ 9-1 循环自相关函数和循环功率谱	315
§ 9-2 平稳分量和周期平稳分量	321
§ 9-3 线性周期时变变换	323
§ 9-4 平稳表示	327
§ 9-5 周期平稳度	335
§ 9-6 周期遍历性	341
参考文献	343
第十章 非平稳随机信号的进化谱	344
§ 10-1 非平稳随机信号谱的频率概念	345

§ 10-2 非平稳随机信号的进化谱理论·····	348
§ 10-3 非平稳随机信号的线性变换(滤波)·····	353
§ 10-4 半平稳随机过程及其进化谱·····	355
§ 10-5 进化谱估计·····	362
附录 10-1 AR(2)过程中 σ_s^2 与 σ_e^2 关系式(10-91)的 证明·····	372
参考文献·····	373
符号说明·····	374

Contents

Chapter 1 Introduction	1
§ 1-1 Time-Frequency Representation of Signals	1
§ 1-2 The Uncertainty Principle of Signals	8
§ 1-3 The Statistical Description of Nonstationary Signals	12
§ 1-4 Time-Varying Spectrum of Nonstationary Signals	20
§ 1-5 Conversion of Nonstationary to Stationary Signal Processing	26
References	29
Chapter 2 Wigner Distribution and Generalized Bilinear Time-Frequency Distribution	31
§ 2-1 Wigner Distribution of Continuous Time Signals	32
§ 2-2 Wigner Distribution of Discrete Time Signals	38
§ 2-3 Computation of Wigner Distribution	45
§ 2-4 Relationship between Wigner Distribution and Ambiguity Function	50
§ 2-5 An Unified Representation of Time-Frequency Distribution	55
§ 2-6 Some Usual Generalized Bilinear Time-Frequency Distribution	61
§ 2-7 Adaptive Time-Frequency Distribution	71

§ 2-8	Wigner-Ville Spectrum of Nonstationary Signals	77
§ 2-9	Example for the Applications of Wigner Distribution	79
Appendix 2-1	Relationship between Wigner Distribution of Continuous and Discrete Time Signals	83
References	.....	85
Chapter 3	Short-Time Fourier Transform and Fractional Fourier Transform	87
§ 3-1	Continuous Short-Time Fourier Transform	87
§ 3-2	Discrete Short-Time Fourier Transform	90
§ 3-3	The Recursive Algorithm for Short-Time Fourier Transforms	97
§ 3-4	Short-Time Power Spectrum	103
§ 3-5	Fractional Fourier Transform	112
§ 3-6	Chirplet Transform and Frequency-Shearing Distribution	122
References	.....	124
Chapter 4	Gabor's Expansion	126
§ 4-1	Continuous Gabor Expansion	127
§ 4-2	Discrete Gabor Expansion	131
§ 4-3	Relationship between the Continuous and Discrete Gabor Expansions	135
§ 4-4	Discrete Zak Transform	142
§ 4-5	Solving Discrete Gabor Expansion with DZT	145
§ 4-6	Periodic Form of Frames in Discrete Gabor Expansions	148

§ 4-7	Finite Orthogonal-Like Gabor Expansion and Infinite Series Discrete Gabor Expansion	155
§ 4-8	Adaptive Gabor Representation	162
§ 4-9	Example for the Applications of Gabor Expansion	166
Appendix4-1	Proof of $Sg_{p,q} = (Sg)_{p,q}$ and $S^{-1}g_{p,q}$ $= (S^{-1}g)_{p,q}$	169
Appendix4-2	Proof of the Optimal Solution (4-131) $Y_{opt} = H^T(HH^T)^{-1}v$	170
References	.....	172
Chapter 5	Wavelet Transform	174
§ 5-1	Continuous Wavelet Transform	175
§ 5-2	Discrete Wavelet Transform	186
§ 5-3	Binary Wavelet Transform	189
§ 5-4	Multiresolution Analysis	196
§ 5-5	The Energy Distribution of Wavelet and in Relationship with Generalized Bilinear Time-Frequency Distribution	206
§ 5-6	The Applications for Wavelet Transform in Random Signal Analysis and Processing	211
References	.....	218
Chapter 6	Adaptive AR Spectral Analysis Method and Piecewise Stationary Parametric Modeling Method	220
§ 6-1	Adaptive AR Spectral Analysis Method	220
§ 6-2	Piecewise Stationary Parametric Modeling Method	230
References	.....	244
Chapter 7	Time-Varying Parametric Model of Nonstationary Random Signals	245

§ 7-1	The Existing Conditions for Time-Varying ARMA Parametric Model of Nonstationary Random Signals	245
§ 7-2	The Estimating Method for Time-Varying Parametric Models	247
§ 7-3	Estimation for Time-Varying Parametric of AR Models	249
§ 7-4	The Equivalent Method of Time-Varying Lattice Filters	254
§ 7-5	Prony's Method	258
§ 7-6	Estimation for Time-Varying Parametric of MA and ARMA Models	260
§ 7-7	Relationship between Time-Varying Parametric Models and Corresponding Wigner-Ville Spectra	265
	References	285
Chapter 8 Variance Stationary Random Signals		
—Nonstationary Random of Mean		
	Value with Trend	287
§ 8-1	The Producing Analysis of Nonstationary Random Signals	288
§ 8-2	Trend Removal Method	293
§ 8-3	Trend Extraction Method	306
	References	313
Chapter 9 Cyclostationary Random Signals		
§ 9-1	Cyclic Autocorrelation and Cyclic Spectrum	315
§ 9-2	Stationary and Cyclostationary Components	321
§ 9-3	Linear Periodically Time-Variant	

Transforms	323
§ 9-4 Stationary Representations	327
§ 9-5 Degree of Cyclostationarity	335
§ 9-6 Cycloergodicity	341
References	343
Chapter 10 Evolutionary Spectrum of Nonstationary	
Random Signals	344
§ 10-1 The Notion of “Frequency” of Spectra for Nonstationary Random Signals	345
§ 10-2 Theory of Evolutionary Spectra for Nonstationary Random Signals	348
§ 10-3 Linear Transforms (i.e. “Filters”) of Nonstationary Random Signals	353
§ 10-4 Semi-Stationary Processes and Corresponding Evolutionary Spectra	355
§ 10-5 Estimation of Evolutionary Spectra	362
Appendix 10-1 Proof of Relationship (10-91) between σ_x^2 and σ_e^2 in AR(2) Processes	372
References	373