

非平稳随机信号 分析与处理

(第2版)

Nonstationary Random Signal Analysis and Processing
(Second Edition)

王宏禹 邱天爽 陈喆 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

TN911.6/141

2008

非平稳随机信号分析与处理

(第2版)

Nonstationary Random Signal Analysis and Processing
(Second Edition)

王宏禹 邱天爽 陈喆 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

非平稳随机信号分析与处理 / 王宏禹, 邱天爽, 陈喆
著. —2 版. —北京: 国防工业出版社, 2008. 4

ISBN 978 - 7 - 118 - 05343 - 2

I. 非... II. ①王...②邱...③陈... III. ①随机信号—信号分析②随机信号—信号处理 IV. TN911

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 133167 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 710 × 960 1/16 印张 23 1/4 字数 398 千字

2008 年 4 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 78.00 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 第五届评审委员会组成人员

主任委员	刘成海			
副主任委员	王峰	张涵信	程洪彬	
秘书长	程洪彬			
副秘书长	彭华良	蔡镭		
委员	于景元	王小谟	甘茂治	刘世参
	李德毅	杨星豪	吴有生	何新贵
	佟玉民	宋家树	张立同	张鸿元
	陈冀胜	周一宇	赵凤起	侯正明
	常显奇	崔尔杰	韩祖南	傅惠民
	舒长胜			
本书主审委员	王小谟			

前 言

国际信号处理的发展可以用一个“非”字来概括,即向非正态、非平稳、非线性方向发展,对其理论与应用研究非常活跃。长期以来,非平稳随机信号处理囿于理论的发展,只好将其粗略地作为平稳随机信号来处理,其结果当然不甚满意,甚至是错误的。正因为如此,非平稳随机信号分析与处理成为亟待解决的问题,为现代信号处理研究的热点,迫切需要比较全面与系统地阐述它的书籍出版。

现出版的随机信号处理书籍均为平稳随机信号方面的,它对线性系统的研究限于时不变的与稳定的,而对信号统计量的研究限于非时变的。但实际上却遇到许多线性系统是时变的与不稳定的,信号的统计量是时变的,即需要研究非平稳随机信号分析与处理。

20世纪80年代后,人们对信号的时频分析进行了深入研究,出版了一些反映其研究成果的《时频分析》或《非平稳信号分析与处理》等书籍。另外,一些非平稳随机类型信号,如周期平稳随机信号等有了新的研究成果,使得非平稳随机信号分析与处理的理论方法得到了发展,内容逐渐丰富起来。为了及时反映这方面的研究成果,写成了《非平稳随机信号分析与处理》一书,于1999年出版。该书中时频分析与一些非平稳随机信号分析与处理各约占一半。迄今,全部为非平稳随机信号分析与处理内容的阐述书籍尚未见到。近年来,非平稳随机信号分析与处理的研究又有了新的发展,作者对其研究有新的体会与新的成果。为此,对作者已出版的一些著作中分散地阐述有关非平稳随机信号分析与处理内容进行综合、提高,丰富许多新内容,删去时频分析内容,写成全部内容为非平稳随机信号分析与处理方面新书,成为1999年已出版的《非平稳随机信号分析与处理》一书的第2版。

本书主要有如下内容。(1)非平稳随机信号分析与处理理论基础,包括非平稳随机信号的统计描述,瞬时频率,线性边界稳定与不稳定系统及时变系统。(2)白噪声通过线性积分产生的非平稳随机信号——维纳(Wiener)过程。(3)各局部为白噪声通过线性时不变稳定系统输出的平稳随机信号——分段平稳随机信号。(4)白噪声通过线性边界稳定与不稳定系统产生的非平稳随机信号,包

括:① 线性系统传递函数极点位于单位圆上且固定的方差平稳随机信号;② 线性系统传递函数极点位于单位圆上且时变的白噪声中时变正弦组合的非平稳随机信号。(5) 白噪声或平稳随机信号通过线性时变系统产生的非平稳随机信号,包括:① 线性时变系统格林(Green)函数为退化的时变参数自回归(AR)、滑动平均(MA)、自回归滑动平均(ARMA)模型非平稳随机信号;② 线性时变系统缓慢变化时的半平稳随机信号;③ 一类特殊的半平稳随机信号——均匀调制的非平稳随机信号;④ Wold - Cramer 演化谱与 Priestley 演化谱。(6) 白噪声或平稳随机信号通过线性周期时变系统产生的非平稳随机信号——周期平稳随机信号。(7) 确定性信号通过线性时变随机系统产生的非平稳随机信号。(8) 非平稳随机信号的预报与滤波——实现其预报与滤波的线性时变系统。(9) 非平稳随机信号的维格纳 - 威利(Wigner - Ville, 即 WV)谱与分数阶 WV 谱。

根据上述内容,全书分为 11 章,依次为概论、瞬时频率、线性时变离散系统的基本理论、维纳过程、分段平稳随机信号、非平稳随机信号的时变参数模型法、白噪声中时变正弦组合的非平稳随机信号、方差平稳随机信号——均值具有趋向性的非平稳随机信号、周期平稳随机信号、非平稳随机信号的演化谱及非平稳随机信号的 WV 谱。

本书是在系统总结国内外关于非平稳随机信号分析与处理的研究成果及作者多年对其研究新成果的基础上撰写而成的。注意它与平稳随机信号处理理论方法的联系及它们一些理论方法之间的关系,并尽量理论联系实际,希望成为一本具有学术性、可读性与实用性,对读者有裨益的著作。

东南大学何振亚教授、北京邮电大学诸维明教授与华中科技大学姚天任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。作者感谢大连理工大学电子与信息工程学院初孟、郭琦、武建等研究生对于本书成书过程中所给予的帮助。

非平稳随机信号分析与处理理论难度大,并处于发展中,理论尚不完备,将其比较全面与系统地成书是很不容易的,而作者水平有限,书中难免存在缺点、错误与不足之处,恳请读者批评和指正,不胜感激。

作 者

2007 年 7 月于大连理工大学

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 非平稳随机信号的统计描述	1
1.1.1 概率密度和数字特征	2
1.1.2 相关函数与协方差函数	3
1.1.3 时变功率谱	5
1.1.4 时变参数模型	6
1.2 非平稳随机信号的时变谱	6
1.2.1 非平稳随机信号的功率谱	7
1.2.2 非平稳随机信号的时频表示	9
1.2.3 演化谱	10
1.3 非平稳随机信号的类型	12
1.3.1 维纳(Wiener)过程	12
1.3.2 分段平稳随机信号	13
1.3.3 时变参数 AR、MA、ARMA 模型非平稳随机信号	13
1.3.4 白噪声中时变正弦组合非平稳随机信号	14
1.3.5 方差平稳随机信号	14
1.3.6 周期平稳随机信号	15
1.3.7 线性时变随机系统输出的非平稳随机信号	16
1.3.8 具有演化谱的非平稳随机信号	16
第 2 章 瞬时频率	18
2.1 瞬时频率的传统定义与估计	18
2.1.1 瞬时频率的传统定义	18
2.1.2 瞬时频率估计	23
2.2 多分量信号的瞬时频率	25

2.2.1	信号的基函数展开简介	25
2.2.2	时变幅度与固定或时变频率的非平稳信号	26
2.2.3	多分量信号瞬时频率的定义	27
2.3	经验模式分解法与瞬时频率的确定	31
2.3.1	应用希尔伯特变换法确定瞬时频率对信号的 限制条件	31
2.3.2	内蕴模式函数与经验模式分解法原理	32
2.3.3	经验模式分解法的实现	34
2.3.4	消除边界效应的方法	38
2.3.5	瞬时频率估计例	39
2.4	确定瞬时频率的平稳相位法	40
2.4.1	线性调频信号的频谱	40
2.4.2	平稳相位法确定瞬时频率	42
附录	黎曼引理的证明	44
第3章	线性时变离散系统的基本理论	47
3.1	线性时变离散系统特性的描述	47
3.1.1	时变脉冲响应与格林函数	47
3.1.2	广义传递函数	48
3.1.3	时变脉冲响应的傅里叶变换	51
3.2	可用线性时变系数差分方程描述的线性时变 离散系统	52
3.2.1	格林函数所应具备的条件	52
3.2.2	广义传递函数所应具备的条件	62
3.3	线性时变离散系统的设计	63
3.3.1	时域奇异值分解法	64
3.3.2	设计例	67
3.4	线性时变离散系统的稳定性	68
3.4.1	线性时变离散系统稳定的时域条件	68
3.4.2	线性时变离散系统稳定的频域条件	70
3.4.3	线性时变递归离散系统的稳定性	73
3.5	线性时变离散系统的级联与平稳随机输入时线性时变	

离散系统的输出	74
3.5.1 线性时变离散系统的级联	74
3.5.2 平稳随机输入时线性时变离散系统的输出	76
3.6 求解线性时变系数差分方程的 E 变换法	77
3.6.1 E 变换及其性质	78
3.6.2 用 E 变换求解齐次线性时变系数差分方程	80
3.6.3 用 E 变换求解非齐次线性时变系数差分方程	83
3.6.4 用 E 变换求解线性时变离散系统的格林函数	84
第 4 章 维纳过程	87
4.1 维纳过程: 积分白噪声	87
4.2 维纳过程: 随机走动极限形式	88
4.2.1 随机走动	88
4.2.2 由随机走动极限形式导出的维纳过程	93
4.2.3 维纳过程的性质	95
4.3 与布朗运动的关系	96
附录 德穆瓦弗雷 - 拉普拉斯定理	99
第 5 章 分段平稳随机信号	101
5.1 平稳随机信号 AR 模型参数估计法与线性预报法	101
5.1.1 $AR(p)$ 模型参数估计的最小二乘法	101
5.1.2 $AR(p)$ 模型参数估计的莱文森 - 德宾 (Levinson - Durbin) 法	103
5.1.3 $AR(p)$ 模型新息预报法	103
5.2 简单的分段平稳随机信号	107
5.3 一般的分段平稳随机信号	108
5.3.1 分段平稳随机信号分段优化方法	108
5.3.2 分段平稳优化方程求解法	110
5.3.3 一种改进的分段平稳优化方程求解法	118
附录 式(5-47)与式(5-48)的证明	121
第 6 章 非平稳随机信号的时变参数模型法	126
6.1 时变参数 ARMA 模型存在的条件	126

6.2	时变参数模型参数估计方法	127
6.2.1	基函数分解展开法	128
6.2.2	自适应小波神经网络法	129
6.3	时变参数 AR 模型参数估计	130
6.3.1	基函数分解展开法对时变参数 AR 模型参数估计	130
6.3.2	基函数分解展开法对时变参数 ARMA 模型中 AR 部分参数估计	131
6.3.3	时变参数 AR 模型参数估计的递推最小二乘(RLS) 算法	133
6.3.4	时变参数 AR 模型参数估计的自适应小波神经 网络法	134
6.3.5	仿真实验	135
6.4	时变参数 MA 与 ARMA 模型参数估计	136
6.4.1	逆函数	137
6.4.2	时变参数 MA 模型参数估计	139
6.4.3	时变参数 ARMA 模型参数估计	140
6.5	非平稳随机信号时变参数模型与其对应的离散 WV 谱 的关系	141
6.5.1	时变参数 MA 模型及其对应的离散 WV 谱	142
6.5.2	由离散 WV 谱确定时变参数 MA 模型	145
6.5.3	由时变参数 MA 模型估计离散 WV 谱	147
6.5.4	时变参数 MA 模型及其对应的连续 WV 谱	147
6.5.5	由时变参数 MA 模型估计时变参数 AR 模型	149
6.5.6	时变参数 ARMA 模型及其对应的离散 WV 谱	150
6.5.7	由离散 WV 谱确定时变参数 ARMA 模型	156
6.5.8	仿真实验	157
	附录 式(6-5)的证明	160
第7章	白噪声中时变正弦组合的非平稳随机信号	162
7.1	皮萨伦科谱分解法	162
7.1.1	时不变正弦波与退化的 AR 模型	162
7.1.2	白噪声中时不变正弦组合为一特殊的	

ARMA 模型	163
7.1.3 特征技术求解法	164
7.2 普罗尼复指数模型法	166
7.3 白噪声中时变正弦组合	169
7.3.1 时变正弦波与退化的时变参数 AR 模型	169
7.3.2 白噪声中时变正弦组合为一特殊的时变参数 ARMA 模型	173
7.3.3 特征技术求解法	174
7.3.4 瞬时频率与时变幅值求解法	176
第 8 章 方差平稳随机信号——均值具有趋向性的非平稳随机信号	179
8.1 均值具有趋向性的非平稳随机信号产生的分析	180
8.1.1 线性时不变连续系统的零点、极点与稳定性	180
8.1.2 线性时不变离散系统的零点、极点与稳定性	183
8.1.3 均值具有趋向性非平稳随机信号的产生	184
8.2 趋势项剔除法	185
8.2.1 ARIMA 模型法	185
8.2.2 季节性模型法	191
8.3 趋势项提取法	198
8.3.1 线性趋势项提取法	198
8.3.2 幂函数趋势项提取法	199
8.3.3 指数趋势项提取法	200
8.3.4 周期趋势项提取法	201
8.3.5 混合趋势项提取法	202
8.4 经验模式分解法提取趋势项	204
第 9 章 周期平稳随机信号	206
9.1 周期平稳随机信号理论	206
9.1.1 定义与基本概念	206
9.1.2 循环自相关函数与循环功率谱	208
9.1.3 谱相关理论与谱冗余	209
9.1.4 表征周期平稳随机信号的另一种方法	210
9.1.5 循环谱密度的经典估计法	212

9.2	周期平稳随机信号输入情况下的 LMS 自适应算法	213
9.2.1	周期平稳随机信号通过线性系统	213
9.2.2	基于 2 阶循环统计量的 LMS 自适应算法	214
9.2.3	算法性能分析	216
9.2.4	仿真实验	217
9.3	线性周期时变(LPTV)系统	218
9.3.1	平稳与周期平稳随机信号通过 LPTV 系统	219
9.3.2	LPTV 系统自适应实现法	221
9.3.3	LPTV 系统周期的自适应估计算法	224
9.3.4	仿真实验	225
9.4	周期平稳随机信号的时变参数模型与其循环统计量的 关系	227
9.4.1	周期平稳随机信号的时变参数模型的存在性	228
9.4.2	周期时变参数 ARMA 模型与其循环统计量的 关系	230
9.5	循环谱密度估计的最大似然滤波器法	237
9.5.1	互谱密度估计的最大似然法	238
9.5.2	循环谱密度估计的最大似然法	241
9.5.3	与循环谱密度的经典估计法的关系	242
9.5.4	仿真实验	243
9.6	循环谱密度估计的最大熵谱法	246
9.6.1	多通道最大熵谱估计	246
9.6.2	循环谱密度的 2 通道最大熵谱估计法	247
9.6.3	仿真实验	248
9.7	周期平稳随机信号循环统计量与维格纳分布的关系	249
9.7.1	周期平稳随机信号循环统计量与维格纳分布的 相似处	250
9.7.2	周期平稳随机信号循环统计量与维格纳分布的 不同点	252
9.8	周期平稳随机信号理论在信号处理中的应用	253
9.8.1	信号检测	253
9.8.2	系统(信道)辨识	254

9.8.3	信道均衡	255
9.8.4	盲自适应波束形成	256
9.8.5	波达方向估计	259
第 10 章	非平稳随机信号的演化谱	261
10.1	平稳随机信号的谱分解	261
10.1.1	随机振幅简谐振动叠加法	261
10.1.2	广义调和分析法	262
10.2	非平稳随机信号的演化谱理论	267
10.2.1	非平稳随机信号演化谱的频率表示	267
10.2.2	Priestley 演化谱	267
10.2.3	Wold - Cramer 演化谱	271
10.2.4	均匀调制的非平稳随机信号及其演化谱	273
10.3	平稳随机信号谱功率估计的最小方差法	277
10.3.1	最大似然滤波器分析法	277
10.3.2	最大似然谱估计分辨率性能	280
10.4	Wold - Cramer 演化谱估计	283
10.4.1	频率 ω_0 处的信号模型	284
10.4.2	$B(n, \omega_0)$ 的估计	285
10.4.3	数据 - 自适应演化谱估计器	287
10.5	非平稳随机信号演化谱的线性变换	291
10.6	半平稳随机信号及其演化谱估计	294
10.6.1	半平稳随机信号	294
10.6.2	时变脉冲响应 $h_g(t, u)$ 中 $g(u)$ 的宽度度量与伪 δ 函数定义	294
10.6.3	半平稳随机信号的演化谱	295
10.6.4	半平稳随机信号的演化谱估计	297
10.7	非平稳随机信号的线性预报与滤波	304
10.7.1	非平稳随机信号的线性预报	304
10.7.2	非平稳随机信号的线性滤波	306
第 11 章	非平稳随机信号的 WV 谱	311
11.1	非平稳随机信号的 WV 谱与相干度	311

11.1.1	非平稳随机连续信号的 WV 谱	311
11.1.2	非平稳随机离散信号的 WV 谱	312
11.1.3	非平稳随机信号的相干度	312
11.2	非平稳随机信号的分数阶 WV 谱	313
11.2.1	分数阶傅里叶变换简介	314
11.2.2	分数阶维格纳分布	316
11.2.3	分数阶模糊函数	319
11.2.4	分数阶 WV 谱	323
11.3	线性时变系统输出的 WV 谱	324
11.3.1	2 维维格纳分布	324
11.3.2	线性时变系统输出的维格纳分布	324
11.3.3	线性时变系统输入与输出 WV 谱之间的关系	326
11.4	线性时变随机系统输出的 WV 谱	327
11.5	非平稳随机信号的平稳度	329
11.5.1	平稳度的定义	330
11.5.2	周期平稳随机信号的周期平稳度(DCS)	331
参考文献		337

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 A Statistical Description of Nonstationary Random Signals	1
1.1.1 Probability Density and Digital Characteristics	2
1.1.2 Correlation Functions and Covariance Functions	3
1.1.3 Time – Varying Power Spectra	5
1.1.4 Time – Varying Parameter Model	6
1.2 Time – Varying Spectrum of the Nonstationary Random Signals	6
1.2.1 Power Spectra of the Nonstationary Random Signals	7
1.2.2 Time – Frequency Distribution of the Nonstationary Random Signals	9
1.2.3 Evolutionary Spectrum	10
1.3 Types of Nonstationary Random Signals	12
1.3.1 Wiener Process	12
1.3.2 Piecewise Stationary Random Signals	13
1.3.3 AR, MA, and ARMA Model Nonstationary Random Signals with Time – Varying Parameters	13
1.3.4 Time – Varying Sinusoidal Combination Nonstationary Random Signals in White Noises	14
1.3.5 Variance Stationary Random Signals	14
1.3.6 Cyclostationary Random Signals	15
1.3.7 The Nonstationary Random Signals Outputted from the Linear Time – Varying Random Systems	16
1.3.8 The Nonstationary Random Signals with Evolutionary Spectra	16
Chapter 2 Instantaneous Frequency	18
2.1 The Classical Definition of Instantaneous Frequency and	