

清华大学学术专著

时间序列分析

—— 高阶统计量方法

张贤达 著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

高阶统计量分析是近几年国内外信号处理领域内的一个前沿课题。高阶统计量广泛应用于所有需要考虑非高斯性、非最小相位性、有色噪声、非线性或循环平稳性的各类问题中。本书是国内外第一本全面论述时间序列分析和信号处理中的高阶统计量理论、方法及应用的专著。全书共分十三章,内容包括高阶统计量、非参数化高阶谱分析、因果和非因果非最小相位系统的辨识、自适应估计和滤波、信号重构、信号检测、谐波恢复、多元时间序列分析、时变非高斯信号的时频分析、阵列处理、循环平稳时间序列分析以及其它专题(时延估计、盲反卷积和盲均衡、多维非高斯信号)。

本书可用作系统理论、信息与控制、信号处理、应用数学、物理学等众多专业的大学教师、高年级大学生和研究生的教学参考书,同时对从事时间序列分析和信号处理研究与应用的广大科技工作者有重要的参考和使用价值。

图书在版编目(CIP)数据

时间序列分析——高阶统计量方法/张贤达著. —北京:清华大学出版社, 1996. 4

ISBN 7-302-02017-5

I. 时… II. 张… III. ①时间序列分析-信号分析②信号处理-信号分析-统计-分析 W. ①0211.6②N911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95)第 19600 号

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学校内, 邮编 100084)

印刷者: 北京人民文学印刷厂

发行者: 新华书店总店北京科技发行所

开 本: 850×1168 1/32 印张: 16.75 字数: 430 千字

版 次: 1996 年 6 月第 1 版 1996 年 6 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-02017-5/TN·69

印 数: 0001—2000

定 价: 29.80 元

Abstract

In recent years, higher-order statistics (HOS) have received increasing interest. There are several main motivations behind the use of HOS (especially higher-order cumulants and spectra). These include techniques to: (1) suppress additive colored noise with unknown power spectrum; (2) identify nonminimum phase systems; (3) extract information due to deviations from Gaussianity; (4) detect and characterize nonlinear properties in signals or systems; (5) analyse a cyclostationary time series.

This book consists of thirteen chapters, and provides detailed discussions and studies of HOS and how they are applied in polyspectral estimation, causal/noncausal nonminimum phase system identification, adaptive parameter estimation and filtering, signal reconstruction, signal detection, harmonic retrieval, multivariant time series analysis, time-frequency analysis of time-variate non-Gaussian signals, array processing, cyclostationary time series analysis, and other topics (time delay estimation, blind deconvolution and blind equalization, and multidimensional non-Gaussian signals).

This book can be used as either (a) a textbook or reference book for graduate students, and (b) a self-study book for practicing engineers who wish to learn and apply HOS in time series analysis, signal processing, system theory and so on.

序

在信号处理领域,人们常常习惯于假设信号或噪声服从高斯分布,从而仅用二阶统计量便可提取信息,进行参数辨识以及各种处理。但是,高斯分布只是许多分布类型中的一种。对非线性系统而言,即使输入是高斯信号,其输出却为非高斯信号,因此,非高斯信号是更普遍的信号。对非高斯信号来说,二阶统计量只是其中一部分信息,它不包含相位信息,因此,对非最小相位系统的辨识而言,二阶统计量便显得无能为力。在实际工作中,我们常常面临大量非高斯、非最小相位、非因果、非平稳信号的处理问题。利用高阶统计量便是解决这些问题的主要手段,高阶统计量给我们提供了前所未有的十分丰富的信息,使我们可以辨识非因果、非最小相位、非线性系统;可以抑制高斯或非高斯的有色噪声;可以抽取不同于高斯信号的多种信号特征;可以分析与处理循环平稳信号,等等。从而给信号处理领域开辟了一个崭新的宽阔的前景。因此,高阶统计量的发展与应用是信号处理领域近年来一个十分重要的发展,是现代信号处理的核心内容之一。

人们对高阶统计量的研究已有几十年历史,但是,直至 80 年代后期,这方面的研究才真正得到迅速发展与应用。目前,在每年的国际会议上都可以看到大量有关这方面的研究成果,其应用范围已涉及通信、地球物理、生物医学、故障诊断、声纳等多个领域。在国内,虽然起步晚一些,但也取得不少进展,张贤达教授便是其中较早涉足这一领域的学者,他潜心研究,经多年努力,取得了一系列高水平的出色的研究成果,多数成果刊登在 IEEE 信号处理与信息论方面的汇刊上,受到国内外学者的注意。张贤达教授将高

阶统计量的理论与方法引入研究生的教学中,把学生引导到这一前沿课题,促进了这一领域的研究,同时也为他系统地介绍这一课题积累了丰富的教学经验。

普及高阶统计量的理论及方法,进一步发展这一理论与方法,并将其应用到各个领域中去,已经成为信号处理领域的一个急迫问题。但是,目前缺少系统地介绍这一课题的著作。本书的特点之一是系统而全面地介绍了高阶统计量的理论,同时系统地介绍了该理论在非因果、非最小相位系统参数辨识,在信号滤波、信号检测、信号重构、谐波恢复、多元时间序列分析、时变非高斯信号的时频分析以及循环平稳时间序列分析等一系列时间序列分析与信号处理问题中的应用。更重要的是书中介绍了作者多年的研究成果,包括已发表和未发表的成果,这些高水平的系统的研究成果构成本书的另一重要特色,并使之成为一本出色的专著。

本书的第三个特点是由浅入深,循序渐进,所述理论既严谨又易懂,适合作教材或自学的参考书,它体现了作者多年的教学经验。

我衷心希望本书的出版能在我国进一步普及高阶统计量的理论,推动这一理论与方法的发展,并促进这一理论在我国各个领域的应用。

李衍达

1995年4月于清华大学

前 言

当前,信息科学正面临着深刻的变革与迅猛的发展。信号分析与处理的变革与发展就是其中的一个典型代表。现代信号分析与处理的本质可以用一个“非”字高度概括:研究和分析非线性、非因果、非最小相位系统,非高斯、非平稳、分形(非整数维)信号和非白色的加性噪声。

非因果、非最小相位系统和非高斯信号的主要数学分析工具是高阶统计量。虽然早在 60 年代初,数学、统计学、流体动力学、信号处理和其它领域的研究人员就开始了高阶统计量的研究,但是真正的研究高潮却是在 80 年代后期才形成的。经过短短几年的迅速发展,高阶统计量已在雷达、声纳、通信、海洋学、天文学、电磁学、等离子体、结晶学、地球物理、生物医学、故障诊断、振动分析、流体动力学等领域获得了大量的应用。尤其值得指出的是,高阶统计量理论的进展还带动了高阶循环统计量理论的诞生与发展,使得循环平稳信号分析与处理这一新领域最近得以问世。

在信号处理和系统理论等领域使用高阶统计量的主要动机与出发点可以归结为:(1)抑制加性有色噪声(其功率谱未知)的影响;(2)辨识非因果、非最小相位系统或重构非最小相位信号;(3)抽取由于高斯性偏离引起的各种信息;(4)检测和表征信号中的非线性以及辨识非线性系统;(5)检测和表征信号中的循环平稳性以及分析和处理循环平稳信号。高阶统计量不仅可以自动抑制高斯有色噪声的影响,而且有时也能够抑制非高斯有色噪声的影响;高阶循环统计量则能自动抑制任何平稳(高斯与非高斯)噪声的影响。高阶统计量之所以能够大大超越功率谱和相关函数,道理

其实很简单:高阶统计量包含了二阶统计量没有的大量丰富信息。可以毫不夸张地说,凡是使用功率谱或相关函数进行过分析与处理,而又未得到满意结果的任何问题都值得重新试用高阶统计量方法。

在国内,高阶统计量的研究起步于 80 年代中后期,但进展比较快。现在,广大科学研究者和工程技术人员对在信号处理、系统理论和时间序列分析等领域使用高阶统计量表现出了浓厚的兴趣。使更多的科技工作者和高年级大学生、研究生、大学教师学习和掌握高阶统计量,推动我国在这一新领域的研究与应用,这就是笔者撰写本书的缘由与目的。

有必要指出,有关高阶统计量只在 1993 年出版过一本名为 Higher-Order Spectral Analysis: A Nonlinear Signal Processing Framework (Nikias and Petropulu 著, Prentice-Hall 出版)的书。本书与之不同,重点不在高阶谱分析,而是由浅入深、循序渐进地全面论述高阶统计量(主要是累积量和多谱)的新理论及其在时间序列分析、信号处理和系统理论中的各种主要新方法和应用。书中集中介绍了笔者近年取得的一系列研究成果,其中多数已在 IEEE 信号处理汇刊和 IEEE 信息论汇刊上发表,另外一部分是还未来得及发表的最新研究成果。为了便于关心和试图涉足高阶统计量这一新领域的广大读者系统地进行学习,本书的论述尽可能浅显易懂而又保持理论的严谨性。

全书共 13 章。第 1 章是全书的基础,叙述高阶统计量的定义与性质。第 2 章介绍非参数化高阶谱分析。第 3 章详细分析了非高斯信号与线性系统之间的关系,并论述了因果、非最小相位系统的 ARMA 建模的理论与各种方法。第 4 章介绍非因果系统的辨识。第 5 章为自适应参数估计和非高斯信号的自适应滤波理论。第 6 章重点叙述基于高阶谱、倒双谱和倒互双谱的信号重构理论与方法。第 7 章是信号检测,重点为非高斯噪声中各类信号的检测准

则与方法。第 8 章系统地介绍了利用高阶累积量进行谐波恢复的理论基础与各种方法,特别分析了非高斯有色噪声及混合(高斯和非高斯)有色噪声中的谐波恢复的 ARMA 建模法和 ESPRIT 方法。第 9 章以 Kronecker 积为工具,通过引入随机向量过程的高阶累积量,介绍了多元时间序列分析的高阶统计量方法。第 10 章是时变非高斯信号的时频分析,定义了 Wigner 高阶矩谱,并介绍了暂态信号的检测。第 11 章为阵列处理专题,分别介绍盲信号分离、方向估计与盲最优波束形成。第 12 章介绍循环平稳时间序列分析,其核心——高阶循环累积量理论可看作是由高阶统计量衍生出来的新理论。第 13 章介绍了其它三个专题:时延估计,盲反卷积和盲均衡以及多维非高斯信号处理。

中国科学院院士李衍达教授和保铮教授极为热情地推荐本书作为清华大学学术专著出版,作者还就本书中的许多问题同他们进行过深入的学术讨论,获益匪浅。在此,谨向两位院士致以诚挚的铭谢。

作者在本书中的研究工作得到国家自然科学基金、国家教委留学回国人员专项基金、高等学校博士学科点专项科研基金、航空科学基金和航天基础性研究基金等的资助。

张 贤 达

1995 年 3 月于清华大学

目 录

第 1 章 高阶统计量	1
1.1 特征函数	1
1.1.1 随机变量的特征函数.....	1
1.1.2 随机向量的特征函数.....	5
1.2 高阶矩、高阶累积量及其谱.....	6
1.2.1 高阶矩和高阶累积量的定义.....	7
1.2.2 高阶矩谱和高阶累积量谱的定义	11
1.2.3 高阶矩和高阶累积量的转换关系	13
1.3 高斯过程的高阶矩和高阶累积量.....	17
1.4 高阶累积量的性质.....	20
 第 2 章 非参数化高阶谱分析	25
2.1 BR 高阶谱估计子	25
2.1.1 定义与假设	25
2.1.2 BR 估计子	26
2.1.3 BR 估计子的渐近无偏性	29
2.2 Zurbenko 高阶谱估计子	30
2.3 非参数化双谱估计.....	31
2.3.1 双谱的性质	31
2.3.2 二维窗函数	33
2.3.3 双谱估计算法	38
2.3.4 双谱估计的性能	41
2.4 Hinich 检验与功率谱重构	42

2.4.1	Hinich 检验	42
2.4.2	功率谱重构	44
第3章	因果非最小相位系统的辨识	46
3.1	非高斯信号与线性系统	46
3.1.1	功率谱等价	46
3.1.2	BBR 公式	52
3.1.3	线性非高斯过程的可识别性	55
3.1.4	$1\frac{1}{2}$ 维谱	56
3.1.5	累积量投影性质	57
3.2	FIR 系统辨识	58
3.2.1	$C(q,k)$ 算法	59
3.2.2	RC 算法	60
3.2.3	组合累积量切片法	63
3.2.4	累积量算法	67
3.2.5	闭式递推估计及非线性优化方法	71
3.2.6	MA 模型定阶	77
3.3	因果 ARMA 模型的 AR 辨识	78
3.3.1	AR 参数的可辨识性	78
3.3.2	AR 阶数确定的奇异值分解法	83
3.3.3	AR 参数估计的总体最小二乘法	85
3.4	因果 ARMA 模型的 MA 辨识	87
3.4.1	MA 阶数确定的奇异值分解法	87
3.4.2	MA 参数估计	91
3.5	基于高阶统计量的渐近最优参数估计	97
3.5.1	最小方差估计	98
3.5.2	加权最小二乘估计	99

3.6	高阶最大熵方法	101
第4章	非因果系统的辨识	109
4.1	问题的描述	109
4.2	穷举搜索法与累积量匹配法	111
4.3	转换法	114
4.3.1	非因果 AR 参数估计	114
4.3.2	AR 阶数确定	116
4.4	反因果系统的辨识	117
4.5	非因果系统的线性辨识方法	120
第5章	自适应估计与滤波	123
5.1	基于累积量的 MSE 准则及其应用	123
5.1.1	基于三阶累积量的自相关估计更新	124
5.1.2	基于累积量的 MSE 和 LSE 准则	129
5.1.3	自适应算法	132
5.2	辅助变量法	136
5.2.1	自适应 FIR 算法	136
5.2.2	自适应 IIR 算法	140
5.3	二步(由粗到细)算法	143
5.4	一种各阶累积量通用的 LMS 算法	146
5.4.1	累积量的递推更新	146
5.4.2	MA 和 ARMA 模型参数的自适应估计	147
5.4.3	可变步长选择与性能分析	155
5.5	基于倒谱的自适应 FIR 系统辨识	159
5.5.1	倒谱的定义与性质	160
5.5.2	基于倒谱的 FIR 系统辨识	162

5.5.3	自适应算法的构成	164
第6章	信号重构	169
6.1	基于高阶谱的相位重构	169
6.1.1	基于双谱的相位重构	170
6.1.2	三谱域的相位重构	177
6.2	基于双谱的幅值重构	180
6.2.1	幅值重构的理论基础	180
6.2.2	幅值重构算法	184
6.3	基于倒双谱的信号重构	186
6.3.1	倒谱与倒双谱	186
6.3.2	基于倒双谱的信号重构	193
6.4	利用倒互双谱的信号重构	196
6.4.1	互双谱	197
6.4.2	倒互双谱	199
6.4.3	信号重构	201
第7章	信号检测	204
7.1	高斯噪声中的信号检测	204
7.1.1	确定性信号的检测	204
7.1.2	随机信号的检测	209
7.1.3	算法的实现	210
7.2	非高斯噪声中的谐波检测	212
7.2.1	Priestley 检验	213
7.2.2	Lii-Tsou 检验	215
7.3	非高斯噪声中的确定性信号检测	218
7.3.1	符号与假设	218
7.3.2	非高斯有色噪声的估计	219

7.3.3	广义匹配滤波器	221
7.3.4	广义似然比检验	224
7.4	非高斯噪声中的非高斯信号检测	226
7.4.1	模型与假设	226
7.4.2	双谱检验统计量	227
7.4.3	检验功效	229
第8章	谐波恢复	232
8.1	谐波过程的累积量	232
8.2	高斯有色噪声中谐波恢复的线性预测法	239
8.3	高斯有色噪声中谐波恢复的 MUSIC 法	243
8.4	高斯有色噪声中谐波恢复的 ESPRIT 法	247
8.4.1	谐波频率的估计	248
8.4.2	谐波幅值的估计	250
8.5	非高斯有色噪声中谐波恢复的混合方法	251
8.5.1	理论基础	252
8.5.2	混合方法	255
8.5.3	谐波幅值的估计	257
8.6	非高斯有色噪声中谐波恢复的 ESPRIT 方法	258
8.6.1	矩阵束的构造	258
8.6.2	谐波数目与频率的估计	261
8.6.3	谐波幅值的估计	262
8.6.4	ESPRIT 方法的 TLS 实现	263
8.7	混合噪声中的谐波恢复	265
8.7.1	预滤波谐波信号的性质	265
8.7.2	广义谐波信号的建模	267
8.7.3	谐波恢复方法	270

第 9 章 多元时间序列分析	274
9.1 Kronecker 积	274
9.2 随机向量过程的累积量	277
9.3 状态和输出过程累积量的递推计算	282
9.3.1 状态空间模型	282
9.3.2 状态向量累积量的计算 (时变/非平稳情况)	284
9.3.3 状态向量累积量的计算 (平稳/时不变情况)	291
9.3.4 输出向量累积量的计算	295
9.4 多信道 MA 过程	296
9.5 多信道 ARMA 过程	298
9.5.1 多信道 ARMA 模型	299
9.5.2 因果多信道 ARMA 过程的辨识	300
9.5.3 非因果多信道 ARMA 过程的辨识	305
9.5.4 参数估计子的统计性能分析	309
第 10 章 时变非高斯信号的时频分析	312
10.1 连续 Wigner 高阶矩谱	312
10.1.1 定义	312
10.1.2 性质	316
10.1.3 广义时频高阶谱	321
10.2 Wigner 高阶矩谱和 Wigner 高阶累积量谱 的比较	323
10.3 离散 Wigner 高阶矩谱	325
10.3.1 离散时间 Wigner 高阶矩谱 (DT-WHOS)	325
10.3.2 离散频率 Wigner 高阶矩谱	

	(DF-WHOS)	326
10.3.3	离散时间与频率的 Wigner 高阶矩谱 (DTF-WHOS)	327
10.3.4	DTF-WHOS 的计算	329
10.4	暂态信号的检测	331
第 11 章	阵列处理	334
11.1	引言	334
11.2	盲信号源分离	335
11.2.1	问题的描述	335
11.2.2	二阶方法的缺陷	337
11.2.3	四阶盲分离方法	337
11.3	方向估计	339
11.3.1	MUSIC 类算法	340
11.3.2	渐近最小方差算法	343
11.4	盲最优波束形成	346
11.4.1	基于协方差的波束形成	347
11.4.2	基于累积量的波束形成	349
11.4.3	多路传输现象	351
11.4.4	自适应波束形成	353
第 12 章	循环平稳时间序列分析	356
12.1	正弦波抽取运算	357
12.2	时变矩与时变累积量函数	360
12.3	循环统计量	362
12.3.1	循环矩函数与循环累积量函数	362
12.3.2	频域(时变和循环)统计量	365
12.3.3	循环累积量的优点	368

12.4	k 阶循环多谱估计	371
12.4.1	循环功率谱估计	372
12.4.2	循环多谱估计	375
12.5	信道盲反卷积(I):循环谱相关密度法	380
12.5.1	过采样信道输出的循环平稳性	380
12.5.2	参数化辨识方法	383
12.5.3	非参数化辨识方法	385
12.6	信道盲反卷积(II):循环倒谱法	388
12.6.1	循环倒谱的定义与性质	389
12.6.2	循环倒谱参数的恢复	391
12.6.3	盲信道辨识与均衡	395
12.7	其它应用	397
12.7.1	基于高阶循环累积量的时延估计	398
12.7.2	微弱信号检测	401
12.7.3	方向估计的循环 MUSIC 方法	404
第 13 章	其它专题	406
13.1	时延估计	407
13.1.1	引言	407
13.1.2	频域方法	408
13.1.3	时域方法	410
13.2	盲反卷积和盲均衡	415
13.2.1	引言	415
13.2.2	盲反卷积准则	417
13.2.3	倒三谱	421
13.2.4	倒三谱均衡算法	425
13.3	多维非高斯信号	430
13.3.1	随机场的累积量与多谱	431