

清华大学信息科学技术学院教材——信息与通信工程系列

# 离散随机信号处理

Discrete Random  
Signal Processing

张旭东 陆明泉 编著

Zhang Xudong Lu Mingquan



清华大学出版社

清华大学信息科学技术学院教材——信息与通信工程系列

# 离散随机信号处理

# Discrete Random Signal Processing

张旭东 陆明泉 编著

Zhang Xudong Lu Mingquan

清华大学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统而深入地介绍了现代数字信号处理的基础和一些广泛应用的算法。全书共 10 章,分为四个部分。第一部分包括第 1 章~第 4 章,介绍了研究和学习现代数字信号处理的重要基础,包括随机信号模型、估计理论概要、最优滤波器理论、最优线性预测和最小二乘滤波,这些内容在各种信号处理的研究论文中被广泛使用,是研究信号处理的基础性知识;第二部分包括第 5 章和第 6 章,详细讨论了利用二阶统计量进行信号分析和处理的两个重要应用方向——功率谱估计算法和自适应滤波算法;第三部分为第 7 章和第 8 章,介绍了高阶统计量和循环统计量及其应用,对于非高斯随机信号和非最小相位系统,高阶统计量和循环统计量是非常有效的工具;第四部分包括第 9 章和第 10 章,是时频分析和小波变换原理及应用的概述,这部分材料构成对非平稳信号处理的一个导论。空间阵列信号处理的一些初步内容则穿插在有关章节中,不单独成章。本书在写作中,除注重内容的先进性和系统性外,也尽量做到有启发性、容易读懂、便于自学。

本书可以用作电子与信息系统专业研究生学习信号处理课程的教材,也可供电子、计算机、自动控制、地质勘探、机械振动、航空航天、生物医学工程等专业的教师、研究生、高年级大学生和专业技术人员参考。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

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。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

### 图书在版编目(CIP)数据

离散随机信号处理/张旭东,陆明泉编著. —北京:清华大学出版社,2005.11

(清华大学信息科学技术学院教材——信息与通信工程系列)

ISBN 7-302-11801-9

I. 离… II. ①张… ②陆… III. 离散信号:随机信号—信号处理—高等学校—教材

IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 104517 号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

责任编辑:邹开颜 王一玲

特邀编辑:魏艳春

印刷者:清华大学印刷厂

装订者:三河市新茂装订有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×230 印张:28.25 字数:605千字

版 次:2005年11月第1版 2005年11月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-11801-9/TN·275

印 数:1~3000

定 价:39.00元

《清华大学信息科学技术学院教材》

编 委 会

(以姓氏拼音为序)

主 任：郑大钟

副 主 任：蔡鸿程 汪 蕙 胡事民 任 勇 章 征

王希勤 王 雄 余志平

编 委：高文焕 华成英 陆文娟 王诗宓 温冬婵

萧德云 谢世钟 殷人昆 应根裕 郑君里

郑纬民 周立柱 周润德 朱雪龙

秘 书：王 娜

责任编辑：马瑛琚 王一玲 邹开颜 陈国新

# 出版说明

---

本套教材是针对清华大学信息科学技术学院所属电子工程系、计算机科学与技术系、自动化系、微电子研究所、软件学院的现行本科培养方案和研究生培养计划的课程设置而组织编写的。这些培养方案和培养计划是基于清华大学对研究型大学的定位和对研究型教学的强调,吸纳多年来在教学改革与实践中所取得的成果和形成的共识,历经多届试用和不断修订而形成的。贯穿于其中的“本科教育的通识性、培养模式的宽口径、教学方式的研究型、专业课程的前沿性”的相关思想将成为我们组编本套教材所力求体现的基本指导原则。

本套教材以本科教材为主并适量包括研究生教材。定位上,属于信息学科大类中各个基本方向的基本理论和前沿技术的一套高等院校教材。层次上,覆盖学院公共基础课程、专业技术基础课程、专业课程、研究生课程。领域上,涉及6个系列14个领域,即学院公共基础课程系列,信息与通信工程系列(含通信、信息处理等领域),微电子光电子系列(含微电子、光电子等领域),计算机科学与技术系列(含计算机科学、计算机网络与安全、计算机应用、软件工程、网格计算等领域),自动化系列(含控制理论与控制工程、模式识别与智能控制、检测与电子技术、系统工程、现代集成制造等领域),实验实践系列。类型上,以文字教材为主并适量包括多媒体教材,以主教材为主并适量包括习题集、教师手册等辅助教材,以基本理论和工程技术教材为主并适量包括实验和实践课程教材。列入这套教材中的著作,大多是清华大学信息科学技术学院所属系所院开设的课程中经过较长教学实践而形成的,既有多年教学经验和教学改革基础上新编著的教材,也有部分已出版教材的更新和修订版本。教材总体上将突出求新与求实的风格,力求反映所属领域的基本理

论和新进展,力求做到学科先进性和教学适用性的统一。

本套教材的主要读者对象为电子科学与技术、信息与通信工程、计算机科学与技术、控制科学与工程、系统科学、电气工程、机械工程、化学与技术工程、核能工程等相关理工专业的大学生和研究生,以及相应领域和部门的科学工作者和工程技术人员。我们希望,这套教材既能为在校大学生和研究生的学习提供内容先进、论述系统和适于教学的教材或参考书,也能为广大科学工作者与工程技术人员的知识更新与继续学习提供适合的和有价值的进修或自学读物。我们同时要感谢使用本系列教材的广大教师、学生和科技工作者的热情支持,并热忱欢迎提出批评和意见。

《清华大学信息科学技术学院教材》编委会

2003年10月

# 前言

## Preface

现代数字信号处理的应用非常广泛,不仅包括电子信息领域,还拓展到众多的其他工程领域,如在通信、雷达、导航、生物医学工程、地质勘探、振动测量、自动控制等众多的领域都得到了深入的应用。作为一门学科,现代数字信号处理已形成众多分支,其研究内容深入而广泛,文献资料众多。

本书选择了现代数字信号处理中基础的内容和一些广泛应用的算法,旨在为学生进一步研究和应用现代信号处理打下一个坚实的基础,也为应用提供一些可用的算法。书中主要介绍了随机信号分析和处理的原理和算法,并主要针对离散时间随机信号展开讨论,因此书名定为“离散随机信号处理”。全书大致分为四个部分。第一部分包括第1章~第4章,是研究和学习现代数字信号处理的重要的基础,包括随机信号模型、估计理论概要、最优滤波器理论、最优线性预测和最小二乘滤波,这些内容在各种信号处理的研究论文中被广泛使用,是研究信号处理的基础性知识;第二部分包括第5章和第6章,详细研究了利用二阶统计量进行信号分析和处理的两个重要应用方向——功率谱估计算法和自适应滤波算法;第三部分包括第7章和第8章,讨论了高阶统计量和循环统计量及其应用,对于非高斯随机信号和非最小相位系统,高阶统计量和循环统计量是非常有效的工具,相对其他几部分,第三部分的篇幅是最短小的,仅给出了这些专题的最基本的概述;第四部分包括第9章和第10章,是时频分析和小波变换原理及应用的概述,这部分材料构成对非平稳信号处理的一个导论。空间阵列信号处理的一些初步内容穿插在有关章节中,不单独成章。

本书是在清华大学电子工程系讲授“现代信号处理”研究生课程所

使用的讲义基础上修订整理而成的。在清华大学电子工程系,“现代信号处理”课程定位于“通信与信息系统”和“信号与信息处理”学科研究生的专业基础课,供工学硕士和直读工学博士的研究生选修,在精简了一些较深的理论内容和补充一些应用实例后,也为工程硕士研究生开设了同名课程。原讲义在这些不同课程中使用多次,并根据教学实践作了多次修改,在内容的先进性、系统性和可读性方面做了一些尽可能的努力。

本书可以适用于几种不同的课程安排。

(1) 对于 64 学时的工学硕士和博士研究生课程,除将一些带星号的章节跳过外,其余内容都可以选择。

(2) 对于 48 学时的工学硕士和博士研究生课程,除重点讲授前 6 章的内容外,可从后 4 章中再选择两章内容。

(3) 对于 32 学时的课程,或选择前 6 章作为入门课程,或选择后 4 章作为扩充性课程。

(4) 本书也可用于工程硕士课程,并在清华大学和中国科学院研究生院的工程硕士班上使用过。对于工程硕士课程,应尽量避免一些繁琐的数学推导,重点讲清楚概念和算法过程,并通过仿真实验进一步理解算法的性能。

本书各章都给出了几个需要用 Matlab 仿真的习题(带 \* 号的习题),希望使用本书的学生能够选做其中的一些,这对于理解书中的理论和算法是非常有帮助的。

在我们准备讲义和讲课期间,参考了多部有关信号处理各专题的经典著作,如 Haykin 关于自适应滤波、Kay 关于谱估计、Mallat 关于小波等的著作,对于我们讲义初稿的形成有很大影响,对此,向这些作者表示衷心感谢。本书各章的参考文献列出了本书直接引用和参考的文献。

许多同事和研究生对本书的出版做出了贡献。彭启琮教授和胡广书教授对本书的选材给出了很多有启发性的建议,郑君里教授和应启珩教授阅读了部分书稿并提出许多非常有益的修改意见,彭应宁、山秀明、冯振明、王德生等教授对于作者们的教学和科研工作给予大力支持和帮助,罗淑云教授对于我们的课程设置和更新给予热心支持,在此一并表示感谢。刘铁岩、刘志欣、林彦、秦涛、魏振宇、史鸥、陈玉、张海昆、曹轶伦、李若楠等对原讲义的修改提出了许多建议,并指出了原讲义中的一些疏漏。

由于作者水平、时间和精力所限,本书难免有缺点和不足之处,希望读者批评指正。

作者 于清华园

2005 年 7 月



# 目 录

# Contents

0 绪论 .....	1
1 随机信号基础及模型 .....	5
1.1 随机信号基础 .....	5
1.1.1 随机过程的基本特征 .....	7
1.1.2 自相关矩阵 .....	12
1.1.3 常见信号 .....	15
1.2 随机信号的展开 .....	18
1.2.1 KL 变换 .....	18
1.2.2 由随机序列集表示随机信号的方式 .....	20
1.3 随机信号的功率谱密度 .....	21
1.3.1 功率谱密度的定义和性质 .....	22
1.3.2 随机信号通过线性系统后的自相关和功率谱 .....	25
1.3.3 连续随机信号与离散随机信号的关系 .....	27
1.4 随机信号模型 .....	29
1.4.1 谱分解定理 .....	29
1.4.2 随机信号的 ARMA 模型 .....	32
1.4.3 随机信号表示的进一步讨论 .....	37
1.5 自相关与模型参数的关系 .....	40
1.6 小结和进一步阅读 .....	43
习题 .....	43
参考文献 .....	46

<b>2</b>	<b>估计理论基础</b>	48
2.1	基本的经典估计问题	48
2.2	Cramer-Rao 下界	52
2.3	最大似然估计	56
2.4	Bayesian 估计	59
2.4.1	最小均方 Bayesian 估计	59
2.4.2*	Bayesian 估计的其他形式	63
2.5	线性贝叶斯估计器	64
2.6	小结和进一步阅读	66
	习题	67
	参考文献	69
<b>3</b>	<b>最优滤波器</b>	70
3.1	Wiener 滤波器	70
3.1.1	从估计理论观点导出 Wiener 滤波	72
3.1.2	从正交原理和线性滤波观点分析 Wiener 滤波器	74
3.1.3	IIR Wiener 滤波器	82
3.1.4	通信系统的最佳线性均衡器	85
3.2*	阵列波束形成与 Wiener 滤波	87
3.2.1	阵列波束形成的基础知识	87
3.2.2	用 Wiener 滤波解波束形成问题	90
3.2.3	MVDR 波束形成器	91
3.3	最优线性预测	92
3.3.1	前向线性预测	93
3.3.2	后向线性预测	97
3.3.3	Levinson-Durbin 算法	99
3.3.4	格型预测误差滤波器	103
3.3.5	预测误差滤波器的性质	106
3.4*	Levinson-Durbin 算法和格型滤波器的推广	108
3.4.1	AR 模型和全极点格型	109
3.4.2	乔里奇(Cholesky)分解	110
3.4.3	利用 Cholesky 分解求解 Wiener-Hopf 方程	112
3.5	Kalman 滤波	114
3.5.1	标量随机状态的最优递推估计	114

3.5.2	向量形式的 Kalman 滤波 .....	118
3.5.3	Kalman 滤波器的进一步讨论 .....	125
3.6	小结和进一步阅读 .....	128
	习题 .....	128
	附录 3A 连续时间 Wiener 滤波器 .....	130
	参考文献 .....	133
<b>4</b>	<b>最小二乘滤波 .....</b>	<b>134</b>
4.1	最小二乘估计 .....	134
4.2	最小二乘滤波器的基础 .....	137
4.3	奇异值分解 .....	145
4.4*	总体最小二乘 .....	148
4.5	小结和进一步阅读 .....	149
	习题 .....	149
	参考文献 .....	150
<b>5</b>	<b>功率谱估计 .....</b>	<b>151</b>
5.1	经典谱估计 .....	152
5.2	AR 模型法谱估计 .....	156
5.2.1	最大熵谱估计与 AR 模型方法的等价性 .....	157
5.2.2	AR 模型谱估计的协方差方法 .....	159
5.2.3	改进的协方差方法 .....	163
5.2.4	自相关方法 .....	164
5.2.5	伯格(Burg)算法 .....	166
5.2.6	模型的阶的选择 .....	168
5.2.7	AR 模型谱的进一步讨论 .....	169
5.3*	MA 模型谱估计 .....	172
5.4*	ARMA 模型谱估计 .....	175
5.4.1	改进 Yule-Walker 方程的方法 .....	176
5.4.2	Akaike 的非线性迭代算法 .....	177
5.5*	最小方差谱估计 .....	180
5.6	利用特征空间的频率估计 .....	182
5.6.1	Pisarenko 谐波分解 .....	185
5.6.2	MUSIC 算法 .....	186

5.6.3	ESPRIT 算法	187
5.6.4	模型阶估计	190
5.6.5*	空间线性阵列的 DOA 估计	190
5.7	功率谱估计的一些实验结果	191
5.7.1	经典方法、AR 模型法和 MVSE 方法对不同信号类型的 仿真比较	191
5.7.2	谐波估计的实验结果	207
5.8	小结和进一步阅读	211
	习题	211
	参考文献	213
<b>6</b>	<b>线性自适应滤波器</b>	<b>215</b>
6.1	最陡下降法	219
6.2	LMS 自适应滤波算法	221
6.2.1	基本的 LMS 算法	221
6.2.2	LMS 算法的收敛性分析	222
6.2.3	一些改进的 LMS 算法	227
6.3	递推 LS 算法	229
6.3.1	基本递推 LS 算法	229
6.3.2	RLS 算法的收敛性分析	233
6.4	LMS 算法和 RLS 算法对自适应均衡器的一些仿真结果	234
6.5*	RLS 和 Kalman 滤波的对应关系及自适应滤波算法	239
6.6	LS 滤波的算子理论及应用	241
6.6.1	用矢量空间算子方法表示 LS 滤波器	241
6.6.2	矢量空间算子的阶递推公式	244
6.6.3	矢量空间算子的时间递推公式	245
6.6.4	最小二乘格型算法	249
6.7*	快速横向 LS 自适应滤波算法	255
6.7.1	4 个基本滤波器	255
6.7.2	横向滤波器算子的更新	258
6.7.3	FTF 算法的推导	260
6.8*	IIR 结构的自适应滤波器	262
6.9	自适应滤波器的应用实例	266
6.9.1	自适应干扰对消的应用	266

6.9.2*	自适应波束形成算法 .....	269
6.10*	无期望响应的自适应滤波算法举例:盲均衡 .....	271
6.10.1	恒模算法 .....	272
6.10.2	Bussgang 算法 .....	275
6.10.3	盲反卷算法 .....	277
6.11	小结和进一步阅读 .....	277
	习题 .....	278
	参考文献 .....	280
<b>7</b>	<b>高阶谱分析 .....</b>	<b>282</b>
7.1	引言 .....	282
7.2	高阶(统计)谱的定义 .....	283
7.2.1	高阶累积量和高阶矩的定义 .....	283
7.2.2	高阶谱的定义 .....	285
7.3	高阶累积量和高阶谱的性质 .....	287
7.3.1	高阶累积量的若干数学性质 .....	287
7.3.2	线性非高斯过程的高阶谱 .....	288
7.3.3	非线性过程的高阶谱 .....	288
7.4	高阶谱的估计方法 .....	290
7.4.1	高阶谱的 B-R 估计子 .....	291
7.4.2	一类新的通用多维滞后窗的构造 .....	292
7.4.3	高阶谱的间接估计方法 .....	295
7.4.4	高阶谱的直接估计方法 .....	297
7.5	高阶谱的应用 .....	298
	习题 .....	299
	参考文献 .....	300
<b>8*</b>	<b>周期平稳信号的谱相关分析 .....</b>	<b>301</b>
8.1	周期平稳信号的概念 .....	301
8.2	周期平稳信号的谱相关函数 .....	302
8.3	通信工程中常见已调信号的谱相关函数 .....	304
8.4	小结和进一步阅读 .....	307
	习题 .....	307
	参考文献 .....	307

<b>9 时-频分析方法</b> .....	309
9.1 时-频分析的预备知识 .....	310
9.1.1 傅里叶变换及其局限性 .....	310
9.1.2 时-频分析的几个基本概念 .....	310
9.1.3 框架和 Reisz 基 .....	315
9.2 短时傅里叶变换 .....	317
9.3 Gabor 展开 .....	321
9.3.1 连续 Gabor 展开 .....	321
9.3.2 周期离散 Gabor 展开 .....	325
9.4* Wigner-Ville 分布 .....	328
9.4.1 连续 Wigner-Ville 分布的定义和性质 .....	329
9.4.2 WVD 的一些实例及问题 .....	331
9.4.3 通过离散信号计算 WVD .....	335
9.5* 一般时-频分布: Cohen 类 .....	337
9.5.1 模糊函数 .....	337
9.5.2 Cohen 类的定义与实例 .....	339
9.6 小结和进一步阅读 .....	340
习题 .....	341
参考文献 .....	342
<b>10 小波变换原理及应用概论</b> .....	343
10.1 连续小波变换 .....	344
10.1.1 CWT 的定义 .....	344
10.1.2 CWT 的性质 .....	348
10.1.3 实例 .....	352
10.1.4 Lipschitz 指数与小波变换 .....	355
10.2 尺度和位移离散化的小波变换 .....	356
10.3 多分辨分析和正交小波基 .....	359
10.3.1 多分辨分析的概念 .....	359
10.3.2 小波基的构造 .....	361
10.3.3 离散小波变换的 Mallat 算法 .....	365
10.4 双正交小波变换 .....	367
10.5 小波基实例 .....	369

10.5.1 Daubechies 紧支小波 .....	371
10.5.2 双正交小波基 .....	374
10.6 多维空间小波变换 .....	381
10.7* 小波包分解 .....	383
10.8* 离散小波变换中的边界问题 .....	388
10.9* 提升小波变换和整数小波变换 .....	390
10.9.1 提升小波变换的基本步骤 .....	390
10.9.2 构造小波基的提升方法 .....	393
10.9.3 用提升方法实现小波变换的实例 .....	397
10.9.4 整数小波变换 .....	400
10.10* 小波变换应用实例：图像压缩 .....	402
10.10.1 图像小波变换域的树表示和编码 .....	405
10.10.2 嵌入式小波零树编码 .....	407
10.11* 小波变换的其他应用 .....	413
10.11.1 小波消噪 .....	413
10.11.2 其他应用简介 .....	416
10.12 小结和进一步阅读 .....	416
习题 .....	417
附录 10A 子带编码 .....	418
参考文献 .....	420
<b>附录 A 矩阵论基础 .....</b>	<b>422</b>
<b>附录 B Matlab 函数列表 .....</b>	<b>431</b>

# 0

## 绪论

---

在“信号与系统”与“离散时间信号处理”的基本课程中,已经讨论了连续和离散确定性信号的时域和频域表示方法,以及系统对信号所做的各种处理。但在自然界中遇到的实际信号大都具有随机特性,这样的信号称为随机信号。随机信号的表示、分析和处理与确定性信号有许多不同之处。确定性信号的分析工具是随机信号分析的重要基础,但随机信号分析和处理又有许多不同的方面。本书要讨论的主要问题是离散随机信号的分析 and 处理方法,主要包括如下几方面。

### (1) 信号的特性

随机信号是一个随机过程,它可以是时间连续的,也可以是时间离散的,本书中主要讨论时间离散的随机信号。一个离散随机过程在每一个时刻对应一个随机变量,它服从一个概率分布函数,多个时刻对应的多个随机变量服从联合概率分布函数,这是随机过程的最基本的数学特征。在许多信号处理问题中,需要的是随机过程的更简单的特征,例如,对于各种统计平均量,最常用的是期望值和相关函数。

在对实际信号的分析中,一般只能得到随机过程的一次实现,随机过程的一次实现称为一个时间序列,通过一个时间序列分析或估计随机信号参数和特征,以提取有用的信息。

当随机信号能够用更加特殊的模型表示,分析方法往往会更加有效。例如,最常用的一种模型是线性系统模型,其随机过程由一个差分方程来刻画,差分方程的驱动信号是一个特性已知的简单的随机过程;另一种常用的信号模型是谐波模型,其随机信号由一组具有随机相位的正弦信号组成,噪声干扰就嵌在这个信号模型中。当一个时间序列符合这样的特殊模型时,许多分析和处理方法变得简单甚至具有简捷的闭式方程。



随机信号处理中的一个重要问题,即功率谱估计的现代方法,就是建立在这样一些模型的基础上的。

### (2) 统计意义下的最优滤波

随机信号处理的一个重要问题是波形估计,这类问题也称为滤波问题。滤波一词的含义已远不再限于“选频”这样一个狭窄的概念,凡是对时间序列进行处理以改善对信号的理解的过程均称为滤波。在随机信号作为输入和输出的滤波器中,滤波器的输出怎样是最优的?这个最优的评价准则应该考虑随机信号的特点和不同的应用对象。对随机信号,一个最常用的评价准则是均方误差最小准则。在平稳条件下,对一个期望波形的最优估计问题归结为维纳(Wiener)滤波器理论。作为线性滤波器理论上的目标,Wiener滤波器给出了实际算法可达到的按均方误差准则的最优解,如果按照最大信噪比准则,则可以得到匹配滤波器作为最优解。在非平稳条件下,一个递推的最优滤波器是卡尔曼(Kalman)滤波,Kalman滤波的目标是对随机动力系统的状态变量进行估计和预测,递推结构使得Kalman滤波可以方便地跟踪非平稳变化的状态变量,并可以扩展到非线性系统。

### (3) 具备“学习能力”的实际滤波算法

Wiener滤波器给出了线性滤波在统计意义下的最优解,但Wiener滤波器的实现需要对输入信号的先验统计,并要求输入信号的二阶统计特征是已知的。这在实际应用中是不现实的,一种实际的实现方法是通过学习(或者说是一种递推的调节算法)自适应地获得这些统计量,以得到实际上可实现的滤波器。初始时滤波器的系数是预置的,可能产生较差的估计结果,但随着对环境的学习递推地对滤波器系数作调节,估计结果将收敛到逼近于最优滤波器(Wiener滤波器)的性能。

这类具有学习能力的线性滤波器称为线性自适应滤波器,它已经获得广泛应用,如通信信道的自适应均衡、线性系统辨识、噪音对消、波束形成等。

这类线性自适应滤波器需要一个“教师”的指导,这个“教师”就是一个期望响应信号。例如,在通信系统的自适应均衡器的设计中,通过通信系统接通时的训练序列来提供期望响应。通过一些非线性的调节算法,也可以在无“教师”的条件下逐渐改善滤波器性能,构成信号的盲处理系统,最常用的是盲反卷和盲分离。

### (4) 更多信息的利用和挖掘

在线性自适应滤波和功率谱估计的应用中,仅使用了随机信号的二阶矩。二阶矩对高斯过程给予完全的表示,但对于非高斯过程,二阶矩是不完整的,通过高阶矩可以获得随机信号的更多有用信息。例如二阶矩和功率谱是相位盲的,它们不包含相位信息,利用这些特征对系统进行辨识时,只能处理最小相位系统。利用高阶矩和多谱可以提取信号的相位信息、实现非最小相位系统的辨识,分离高斯和非高斯分量,以及实现系统的盲反卷等。

### (5) 对时间(空间)-频率关系的局域性分析

人们的注意力容易被信号中的瞬变或景物中的运动所吸引,而容易忽略其中的平稳