

# 循环平稳信号处理与应用

黄知涛 周一宇 姜文利 著

国防科学技术大学图书出版基金资助

科 学 出 版 社  
北 京

## 内 容 简 介

循环平稳信号处理是现代信号处理中的一个重要研究方向,在雷达、通信、声呐、导航、电子对抗等众多领域有极为广阔的应用前景。本书深入、系统地论述了循环平稳信号处理的基本理论和方法,总结了作者多年来的研究成果和国际上这一领域的研究进展。全书由7章组成,内容包括循环平稳信号处理的研究进展、循环平稳信号线性滤波模型及方法、循环平稳信号检测方法、循环模糊函数及其在循环平稳信号设计中的应用、宽带循环平稳信号空间谱估计方法等。

本书可供从事雷达、通信、声呐、导航与电子对抗等领域的广大技术人员学习和参考,也可作为高等院校和科研院所信号与信息处理、信息与通信系统等专业的研究生教材或参考书。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

循环平稳信号处理与应用/黄知涛,周一宇,姜文利著. —北京:科学出版社, 2006

ISBN 7-03-016985-9

I. 循... II. 黄... 周... 姜... III. 信号处理-研究 IV. TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第016594号

---

责任编辑:胡 凯 贾瑞娜/责任校对:张 琪

责任印制:安春生/封面设计:陈 敬

**科 学 出 版 社** 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

**中国科学院印刷厂** 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2006年5月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2006年5月第一次印刷 印张: 19 1/2

印数: 1—2 500 字数: 369 000

定价: **42.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换 新欣)

# 前 言

循环平稳信号处理是现代信号处理中的一个重要研究方向，其优异的性能和广阔的应用前景引起了人们极大的兴趣。在过去的五十多年里，许多专家学者对这一技术进行了广泛而深入的研究，取得了极为丰硕的成果，极大地推动了该学科及其相关领域的发展。

从 20 世纪 50 年代末期开始，循环平稳信号处理技术的发展大致经历了三个阶段，分别是起步阶段、应用基础理论奠基阶段和应用发展阶段。50 年代末期到 80 年代末期是循环平稳信号处理技术的起步阶段，人们的研究主要集中在对循环平稳信号特性的认知上，即如何表征循环平稳信号。80 年代末期到 90 年代中期是循环平稳信号处理技术的应用基础理论奠基阶段。此时，研究人员对循环平稳信号的本质特征已经有了深刻的理解，并且提出了分析这种本质特征的数学工具，人们的研究主要集中在构建对循环平稳信号的基本处理框架上，包括循环平稳信号的检测和参数估计理论等。90 年代中期以后是循环平稳信号处理技术的应用发展阶段。该阶段的研究主要集中在如何将信号的循环平稳性特征与传统处理方法以及不同的应用场合相结合，研究面向不同应用背景的循环平稳信号处理方法，如利用循环平稳信号处理技术进行盲通道均衡、盲自适应波束形成、系统辨识，以及将循环平稳信号处理技术与高阶累积量方法相结合等。

目前，循环平稳信号处理理论与技术已日趋成熟，应用领域日益扩大，新理论、新方法不断涌现，可以说仍处于方兴未艾的蓬勃发展中。因此，要想完整、系统和全面地阐述该领域的丰富知识和反映其最新的研究成果难度很大。到目前为止，在国内还没有一本较系统、较完整地阐述循环平稳信号处理理论与技术的专著。为此，我们总结了近 50 年来关于循环平稳信号处理的相关研究成果，结合我们多年来的研究和教学实践，写成此书，相信它能对从事循环平稳信号处理、非平稳信号处理与应用领域的科技人员及高等院校师生有所裨益。

本书较系统地介绍了循环平稳信号处理的概念、原理与方法，尤其详细地介绍了许多典型算法并进行了深入研究，并给出了大量的定性与定量分析结果。全书共 7 章，内容包括：循环平稳信号处理的进展、现状和展望；循环平稳信号处理的基本原理、数学模型及相关概念，典型信号的循环平稳特性分析及循环平稳信号处理性能的定性和仿真分析；循环平稳信号的线性滤波方法；循环平稳信号检测问题；循环平稳信号时间频率参数估计问题；循环模糊函数的概念及其应用；循环平稳信号空间谱估计算法及性能。

本书具有以下特色：

(1) 文献资料收集完整。从 20 世纪 50 年代至今，循环平稳信号处理理论与技术已日益完善。为写好此书，我们收集了大量国内外文献资料，尤其是国外研究资料，包括公开发表的论文、书籍、研究报告和博士论文，在此基础上进行了精心组织、提炼和总结，尽可能反映出这一学科的精华内容。

(2) 内容新。目前，国内已有几本信号处理专著在部分章节中讨论了循环平稳信号的处理理论和技术，基本上都是整理了部分国外公开的研究成果。在本书中，我们对循环平稳信号处理理论与技术进行了高度总结，力求反映出其最新的研究成果与最新进展，特别是充分反映我们近年来的研究成果、心得与想法。

(3) 可读性强。根据我们多年的研究和实践，我们对循环平稳信号处理进行了高度的总结，从基本原理到应用，力求做到深入浅出，并将原理与仿真实验相结合，使读者的理解更加直观和深刻。

为了实现上述特色，我们从开始撰写到完成本书已历时 4 年，但由于本学科发展极为迅速，实际应用领域甚广，加上作者水平有限，书中难免存在不妥与不足之处，敬请读者批评指正！

清华大学的山秀民教授、国防科学技术大学的皇甫堪教授和沈振康教授热情推荐本书出版，并对本书的写作提出了许多宝贵意见。本书第一作者在攻读博士学位期间，山秀民教授、皇甫堪教授、沈振康教授、梁甸农教授从论文的选题到写作给予了作者开拓性的指导，谨向他们致以衷心的感谢！在本书的撰写过程中，得到了王丰华博士、杨博博士在文稿整理等多方面的帮助与支持。此外，还要感谢国防科学技术大学电子科学与工程学院领导和同志们的支持、关心和帮助。

作 者

2005 年 7 月

# 目 录

## 前言

第 1 章 引论	1
1.1 引言	1
1.2 循环平稳信号处理发展概况	2
1.2.1 循环平稳信号处理技术的起步	2
1.2.2 循环平稳信号处理技术的应用基础	4
1.2.3 循环平稳信号处理技术的应用与发展	6
1.3 循环平稳信号处理研究进展及相关问题	9
1.3.1 对循环平稳信号的线性时不变滤波	9
1.3.2 循环平稳信号时频二维联合处理	10
1.3.3 对循环平稳信号的空间谱估计方法	11
1.3.4 利用多循环频率信号信息的循环平稳信号处理技术	12
1.4 展望	13
小结	14
参考文献	15
第 2 章 循环平稳信号处理概述	23
2.1 一阶循环平稳和循环均值	23
2.2 循环自相关和谱相关	25
2.2.1 循环自相关和谱相关	25
2.2.2 循环谱的物理模型	26
2.2.3 谱自相干函数	27
2.2.4 谱支撑域	27
2.2.5 循环自相关函数和谱自相关函数的离散表示	29
2.3 谱自相关函数估计方法	30
2.4 典型信号的谱相关分析	31
2.5 谱相关分析的特点	33
小结	35
参考文献	35
第 3 章 循环相关匹配滤波理论	36
3.1 循环平稳信号和平稳信号相关函数特性分析	36

3.1.1	连续循环互相关的逼近特性	37
3.1.2	离散循环互相关的逼近特性	40
3.1.3	计算机仿真分析	41
3.2	循环相关匹配滤波器设计	43
3.2.1	循环相关匹配滤波器	43
3.2.2	预白化处理在循环相关匹配滤波器设计中的应用	46
3.2.3	循环相关匹配滤波器的性质	47
3.2.4	循环相关匹配滤波器设计实例	50
3.3	多循环频率循环相关匹配滤波器组	63
3.3.1	单循环频率循环相关匹配滤波器的“固有缺陷”	63
3.3.2	多循环频率循环相关匹配滤波器组	63
3.3.3	循环相关匹配滤波器组设计实例	67
3.4	循环相关匹配滤波性能	68
3.4.1	高斯白噪声背景循环相关匹配滤波器(组)性能分析	69
3.4.2	一般平稳噪声背景循环相关匹配滤波器(组)性能分析	71
3.4.3	全相干循环频率	73
3.4.4	非平稳噪声背景循环相关匹配滤波器(组)性能分析	75
3.5	非合作条件下循环相关匹配滤波器设计	75
3.5.1	单通道非合作接收条件下的准最佳循环相关匹配滤波	75
3.5.2	双通道非合作接收条件下的准最佳循环相关滤波	76
	小结	79
	参考文献	79
第4章	循环平稳信号检测方法	80
4.1	基于循环相关匹配滤波器的信号检测方法	80
4.2	非合作单通道信号检测方法	82
4.3	非合作双通道信号检测方法	83
4.4	SPB、PSPB 和 SCCMF 三种检测器的相互关系	85
4.5	对弱信号的循环平稳检测	87
4.6	SCCMF 检测器与 SC 检测器的比较	88
4.7	合作条件下信号检测性能仿真分析	88
4.7.1	时变噪声环境	89
4.7.2	对 SCCMF 检测器的仿真结果	90
4.7.3	对 MCCMF 和 AMCCMF 检测器的仿真结果	92
4.8	非合作条件下信号检测仿真分析	94
4.8.1	非合作单通道信号检测仿真分析	94

4.8.2 非合作双通道信号检测仿真分析	95
小结	96
参考文献	97
第5章 循环平稳信号时差、频率估计	98
5.1 循环平稳信号时延/时差估计方法	98
5.1.1 基于循环相关匹配滤波的信号时延估计方法	99
5.1.2 非合作条件下信号时差估计方法	104
5.1.3 已有的循环平稳信号时差/时延估计方法	109
5.1.4 S-CCMF 时延估计器的仿真结果	110
5.1.5 对 PS、PS-CCMF 时差估计器的仿真结果	112
5.2 循环平稳信号时差(时延)-多普勒频移联合估计方法	114
5.2.1 时差-多普勒频移联合估计方法	114
5.2.2 归一化互相关多普勒频移估计方法	120
5.3 合作条件下时延-多普勒频移估计精度分析	121
5.3.1 时延估值的理论精度	121
5.3.2 多普勒频移估值的理论精度	131
5.3.3 时延和多普勒频移联合估值的理论精度	138
5.4 非合作条件下时差-多普勒频移估计精度分析	139
5.4.1 时差估计精度分析	139
5.4.2 多普勒频移估计精度分析	142
5.4.3 时差-多普勒频移联合估值精度	146
5.5 参数估计精度仿真分析	147
5.5.1 仿真说明	147
5.5.2 时延估计精度仿真	148
5.5.3 时差估计精度仿真	158
5.5.4 理想参考信号多普勒频移估计精度仿真	164
5.5.5 参考信号存在噪声干扰时频移估计精度仿真	168
小结	172
参考文献	172
第6章 循环模糊函数及其应用	173
6.1 循环(互)模糊函数及其性质	173
6.1.1 循环(互)模糊函数的定义	173
6.1.2 循环模糊函数的性质	175
6.2 几种典型循环平稳信号的循环模糊图	176
6.2.1 调幅信号的循环模糊函数	177

6.2.2	PAM 信号的循环模糊函数	179
6.2.3	BPSK 信号的循环模糊函数	182
6.3	循环模糊图决定的参量分辨力	186
6.3.1	循环模糊函数决定的距离分辨力	186
6.3.2	循环模糊函数决定的速度分辨力	189
6.3.3	距离-速度二维循环分辨力	191
6.3.4	时延、多普勒频移估值精度与循环模糊函数的关系	191
6.4	循环模糊函数在信号设计中的应用	192
6.5	循环模糊函数与模糊函数的比较	196
6.6	广义循环(互)模糊函数及其应用	196
6.7	循环(互)模糊函数组及其应用	198
6.7.1	循环(互)模糊函数组	198
6.7.2	基于循环互模糊函数组的时差-多普勒频移估计方法	199
6.7.3	基于循环互模糊函数组时延估计精度分析	200
6.7.4	基于循环互模糊函数组时差估计精度分析	210
6.7.5	基于循环互模糊函数组多普勒频移估计精度分析	214
6.8	循环模糊函数在基于非合作辐射源目标探测系统中的应用	221
6.8.1	基本原理	222
6.8.2	对实测数据的处理结果	222
6.8.3	利用实测数据构造模拟目标进行时差、多普勒频移估计精度分析	224
6.8.4	结论	226
	小结	226
	参考文献	227
第 7 章	宽带循环平稳信号空间谱估计方法	228
7.1	一阶循环平稳信号的 DOA 估计方法及其在“干涉仪”测向中的应用	228
7.1.1	基于信号一阶循环平稳特性的 DOA 估计方法	228
7.1.2	基于信号一阶循环平稳特性的 DOA 估计方法在干涉仪测向中的应用	232
7.1.3	仿真分析	236
7.1.4	结论	238
7.2	基于循环互相关的信号子空间拟合 DOA 估计方法	238
7.2.1	阵列处理模型	238
7.2.2	算法建模	240
7.2.3	仿真分析	242
7.2.4	结论	244



7.3 基于加权循环谱的 DOA 估计方法	244
7.3.1 基于谱相关特性的信号子空间拟合(SC-SSF)DOA 估计方法	244
7.3.2 基于加权循环谱信号子空间拟合 DOA 估计方法	246
7.3.3 weighted SC-SSF 算法与已有 SC-SSF 算法比较	249
7.3.4 仿真分析	249
7.3.5 结论	250
7.4 多循环频率 DOA 估计方法	250
7.4.1 基于聚焦变换的多循环频率 DOA 估计方法	251
7.4.2 关于 $N$ 取值的讨论	253
7.4.3 基于最小方差谱估计的多循环频率 DOA 估计方法	255
7.4.4 仿真分析	257
7.4.5 结论	261
7.5 有限取样数对特征分解精度的影响	261
7.6 SC-MUSIC 算法估计性能分析	272
7.6.1 基于二阶循环平稳特性 DOA 估计方法的循环 CRB	273
7.6.2 SC-MUSIC 算法的估计方差	278
7.6.3 结论	285
7.7 多循环频率 DOA 估计方法性能分析	286
7.7.1 多循环频率 DOA 估计方法的循环 CRB	286
7.7.2 基于聚焦变换的多循环频率 SC-MUSIC 算法的估计方差	287
7.7.3 结论	290
小结	290
参考文献	291
附录 A 关于式(6.68)的推导	294
附录 B 关于式(6.71)的推导	295
附录 C 关于式(7.137)的推导	296
附录 D 关于式(7.258)的推导	298

# 第 1 章 引 论

## 1.1 引 言

在通信、遥测、雷达和声呐等系统中经常遇到的许多信号，它们的特定阶统计特征参数往往是随时间周期性变化的，这类信号统称为“循环平稳信号”(cyclostationary signal)。例如，各种正弦波幅度、相位、频率调制信号，数字通信系统中的振幅、相位、频率键控信号，电视、传真及雷达系统中各种周期扫描过程产生的信号，以及声呐、导航、遥控、遥测等信号都是循环平稳信号<sup>[1~7]</sup>。

除了上述人工信号外，由于地球自转和公转的周期性，一些具有昼夜或季节性规律变化的自然界信号，如水文数据、气象数据、海洋信号和天文信号等，都是典型的循环平稳信号，心电图等人体信号也具有循环平稳性<sup>[1, 3, 4, 7]</sup>。

许多传统的统计信号处理方法在处理循环平稳信号时都假定信号是平稳的，即认为其统计特征参数是不随时间变化的<sup>[1]</sup>。例如，对于周期为  $T$  的二阶广义循环平稳随机信号  $x(t)$ ，其一阶和二阶统计特征参数为

$$m_x(t) \triangleq E\{x(t)\} = m_x(t+T) \quad (1.1)$$

$$k_{xx}(t, s) \triangleq E\{x(t)x^*(s)\} = k_{xx}(t+T, s+T) \quad (1.2)$$

构造新的平稳过程  $\tilde{x}(t)$ ，其一阶和二阶统计特征参数如下，即

$$\tilde{m}_x = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} m_x(t) dt \quad (1.3)$$

$$\tilde{k}_{xx}(\mathbf{t}) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} k_{xx}(t+\mathbf{t}, t) dt \quad (1.4)$$

通过上述时间平均等价得到如下的信号模型<sup>[1]</sup>，即

$$\tilde{x}(t) = x(t+\mathbf{q}) \quad (1.5)$$

$$p_{\mathbf{q}}(\mathbf{a}) = \begin{cases} \frac{1}{T}, & |\mathbf{a}| \leq \frac{T}{2} \\ 0, & |\mathbf{a}| > \frac{T}{2} \end{cases} \quad (1.6)$$

式中,  $p_{\epsilon}$  是  $\epsilon$  的概率密度函数(关于  $\epsilon$  物理意义的详细说明见文献[1])。

在某些场合, 上述处理过程是有效的。例如, 循环平稳信号作为干扰信号存在于平稳信号中, 在进行平稳信号检测及参数估计时, 上述处理过程能降低循环平稳信号的非平稳性对检测及参数估计的影响<sup>[1]</sup>。

然而, 在大多数针对循环平稳信号的系统中, 上述处理过程不能达到最佳的处理性能。一个简单的例子是对循环平稳信号进行最佳滤波的问题。如果对循环平稳信号进行如式(1.5)的变换, 则对式(1.5)所示信号进行最佳滤波的滤波器是一个线性时不变系统。然而可以证明<sup>[1]</sup>, 直接对循环平稳信号进行最佳滤波的滤波器应是一个线性周期时变系统, 并且这种线性周期时变滤波的处理性能要优于线性时不变滤波处理方法。

这说明, 由于忽略了信号的循环平稳性特征, 传统的基于平稳性假设的统计信号处理方法不可能实现对循环平稳信号的最佳处理, 必须研究能充分利用信号循环平稳特征的新的信号处理方法。

## 1.2 循环平稳信号处理发展概况

从 20 世纪 50 年代末期开始, 循环平稳信号处理技术的发展经历了大致三个阶段, 分别是起步阶段、应用基础理论奠基阶段和应用发展阶段。50 年代末期到 80 年代末期是循环平稳信号处理技术的起步阶段, 人们的研究主要集中在对循环平稳信号特性的认知上, 即如何表征循环平稳信号<sup>[8~17]</sup>。80 年代末期到 90 年代中期是循环平稳信号处理技术的应用基础理论奠基阶段。此时, 研究人员对循环平稳信号的本质特征已经有了深刻的理解, 并且提出了分析这种本质特征的数学工具, 人们的研究主要集中在构建对循环平稳信号的基本处理框架上, 包括循环平稳信号的检测和参数估计理论等<sup>[18~27]</sup>。90 年代中期以后是循环平稳信号处理技术的应用发展阶段。该阶段的研究主要集中在如何将信号的循环平稳性特征与传统处理方法以及不同的应用背景相结合, 研究面向不同应用背景的循环平稳信号处理方法, 如利用循环平稳信号处理技术进行盲通道均衡、盲自适应波束形成、系统辨识, 以及将循环平稳信号处理技术与高阶累积量方法相结合等<sup>[28~161]</sup>。

### 1.2.1 循环平稳信号处理技术的起步<sup>[1, 14]</sup>

最早对具有式(1.1)和式(1.2)所示统计特征的非平稳随机过程展开研究的是 Bennett<sup>[13]</sup>。Bennett 在 1958 年发表的论文中<sup>[13]</sup>首次用“cyclostationary”一词来描述上述非平稳随机过程所具有的统计特征。当时, 还有其他研究人员用不同的术语来描述上述特征, 如 periodically stationary(周期平稳)、periodically correlated(周期相关)、periodically nonstationary(周期非平稳)等, 参见文献[8]~[12]。虽然当时

用来描述该类随机过程的术语不同，但至少人们已经认识到该类随机过程隐含有周期性(periodicity)。

基于对循环平稳随机过程统计特征参数周期性的认识，人们开始寻求对循环平稳信号的特征表示方法。主要有三种，分别是 FSR(Fourier series representation)、HSR(harmonic series representation)和 TSR(translation series representation)。

FSR 表示方法<sup>[8, 10, 11]</sup>将循环平稳信号的时变自相关函数表示成如下所示的 Fourier 级数的形式，即

$$R_x(t, s) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n(t-s) \exp\left[\frac{j\pi n(t+s)}{T}\right] \quad (1.7)$$

其中

$$c_n(\mathbf{t}) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} R_x\left(s + \frac{\mathbf{t}}{2}, s - \frac{\mathbf{t}}{2}\right) \exp\left(-\frac{j2\pi n s}{T}\right) ds \quad (1.8)$$

HSR 表示方法<sup>[9]</sup>将循环平稳信号表示成若干谐波信号叠加的形式，即

$$x(t) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} a_p(t) \exp\left(\frac{j2\pi p t}{T}\right), \quad t \in (-\infty, +\infty) \quad (1.9)$$

其中

$$a_p(t) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} w(t-\mathbf{t}) x(\mathbf{t}) \exp\left(-\frac{j2\pi p \mathbf{t}}{T}\right) d\mathbf{t} \quad (1.10)$$

$$w(t) \triangleq \frac{\sin\left(\frac{\pi t}{T}\right)}{\pi t} \quad (1.11)$$

这样，循环平稳信号的时变自相关函数就可以写为

$$R_x(t, s) = \sum_{p, q=-\infty}^{\infty} r_{pq}(t-s) \exp\left[\frac{j2\pi(p t - q s)}{T}\right] \quad (1.12)$$

其中

$$\begin{aligned} r_{pq}(t-s) &\triangleq E\{a_p(t) a_q^*(s)\} \\ &= \iint_{(-\infty, \infty)} w(t-\mathbf{t}) w(s-\mathbf{g}) R_x(\mathbf{t}, \mathbf{g}) \exp\left[-\frac{j2\pi(p \mathbf{t} - q \mathbf{g})}{T}\right] d\mathbf{t} d\mathbf{g} \quad (1.13) \end{aligned}$$

TSR 表示方法<sup>[12]</sup>将循环平稳信号的时变自相关函数表示成下面的形式，即

$$R_x(t, s) = \sum_{n, m=-\infty}^{\infty} \sum_{p, q=1}^{\infty} r_{pq}(n-m) \mathbf{f}_p(t-nT) \mathbf{f}_q^*(s-mT) \quad (1.14)$$

其中

$$\begin{aligned} r_{pq}(n-m) &\triangleq E[a_p(n)a_q^*(m)] \\ &= \iint_{(0, T)} R_x[t+(n-m)T, s] \mathbf{f}_p^*(t) \mathbf{f}_q(s) dt ds \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$\mathbf{f}_p(t) = \sqrt{T} \exp\left(\frac{j2\pi pt}{T}\right) \frac{\sin\left(\frac{\pi t}{T}\right)}{\pi t} \quad (1.16)$$

上述三种表示方法更多地是从数学的角度来分析该过程，实质都是在一组正交完备基上将时变自相关函数展开，区别在于基函数不同。由于上述描述方法的复杂性，并且物理意义也不明显，决定了它们不可能有太广泛的应用。实际上，循环平稳信号处理技术发展到现在，上述三种表示方法已经被逐渐淘汰，应用更多的是 W. A. Gardner 提出的谱相关表示方法<sup>[16,17]</sup>(关于谱相关分析的有关内容参见第 2 章)。

W. A. Gardner 的谱相关理论首次揭示了循环平稳信号的本质特征——谱相关特性，即将信号瞬时谱在频率上分别上下搬移一定值后得到的两个信号谱具有相关性，搬移的频率差值就是信号的循环频率。W. A. Gardner 还给出了分析信号谱相关特性的数学工具——循环相关函数和循环谱相关函数<sup>[16~18]</sup>。

谱相关理论不仅深刻揭示了循环平稳信号的本质特征，更奠定了循环平稳信号处理的理论基础，为循环平稳信号处理技术的发展提供了方向和动力。同时，W. A. Gardner 等人还详细研究了高精度的循环相关函数和循环谱相关函数计算方法<sup>[18]</sup>，为谱相关理论的实际应用铺平了道路。

随后，W. A. Gardner 等人利用谱相关理论详细分析了雷达、通信、声呐等系统中的几种常见的循环平稳信号<sup>[3,4]</sup>，使人们对循环平稳性有了更直观的了解，进一步明确了谱相关理论的应用对象和特点。

## 1.2.2 循环平稳信号处理技术的应用基础

信号检测和信号参数估计虽不是信号处理的全部内容，但一直以来都是信号处理领域两个最基本的问题<sup>[1162~165]</sup>。在谱相关理论被提出来以后，利用谱相关理论构建信号处理算法所面临最突出的问题就是对循环平稳信号的检测和参数估计

方法。

1988 年, W. A. Gardner 发表了关于循环平稳信号截获<sup>[25]</sup>和时差估计<sup>[24]</sup>的论文。论文首次将谱相关理论用于对循环平稳信号的检测和参数估计, 构建了循环平稳信号检测和参数估计的理论框架。同年, W. A. Gardner 发表了关于循环平稳信号方向估计的论文<sup>[26, 27]</sup>。在窄带信号假设的前提下, 通过计算信号的循环自相关函数, 并构造相应的协方差数据矩阵, 再结合传统的空间谱估计方法, 如 MUSIC、ESPRIT 算法, 实现了对空间源信号的方向估计, 该方法被称为 Cyclic MUSIC。

将谱相关理论用于信号检测、参数估计及空间谱估计等领域奠定了谱相关理论的应用基础。

1992~1994 年, W. A. Gardner、C. M. Spooner、A. V. Dandawate 等在文献[25]的基础上进一步研究了对循环平稳信号的检测方法<sup>[28, 29, 37~39]</sup>。例如, A. V. Dandawate 从统计假设检验理论出发研究了基于循环相关函数的信号检测方法<sup>[29]</sup>, 其检测依据是信号的循环相关函数只在特定的循环频率处不为零。W. A. Gardner 分析了文献[25]中循环检测器的检测性能<sup>[38]</sup>, 并与传统的互相关检测方法进行了比较, 指出循环估计器在时变或者未知特性噪声背景情况下具有更好的检测性能。C. M. Spooner 研究了对噪声中直接序列扩谱信号(direct sequence spread-spectrum)的检测问题<sup>[28]</sup>, 并构建了具有延迟积形式的稳健的检测结构。这些研究完善了谱相关检测理论。

1992 年 W. A. Gardner 等人又更深一步研究了在强杂波干扰环境下对循环平稳信号的时差估计问题<sup>[40~42, 45, 47~49]</sup>, 给出了几种典型的基于循环互相关函数和循环谱互相关函数的估计算法。这些研究完善了谱相关理论在时差估计领域的应用。

关于 Cyclic MUSIC 的估计性能, S. V. Schell 等人详细分析了对循环平稳信号方向估计的 Cramer-Rao 限<sup>[117]</sup>, 并与平稳高斯信号方向估计的 Cramer-Rao 限<sup>[116]</sup>进行了比较, 指出基于信号循环平稳性的 DOA(direction-of-arrival)估计方法要优于传统空间谱估计方法。然而 Cyclic MUSIC 算法是在窄带信号假设条件下推导得到的, 这极大地限制了该算法的实际应用。G. H. Xu 等人重新研究了基于谱相关的 DOA 估计问题<sup>[36, 119]</sup>, 并直接将谱相关理论用于原始阵列信号模型, 得到了一个新的与信号带宽无关的阵列处理模型, 对该处理模型运用经典的高分辨谱估计算法即可实现对空间源信号的方向估计。该研究成果完善了谱相关理论在空间谱估计领域的应用。

至此, 谱相关理论在信号检测、信号参数估计等领域的应用已日渐完善, 使得谱相关理论向更广更深层次的应用和发展成为了可能。

### 1.2.3 循环平稳信号处理技术的应用与发展

到 20 世纪 90 年代中期,循环平稳信号处理技术的发展已取得了令人瞩目的成就。鉴于循环平稳信号处理方法的优越性能,谱相关理论逐渐被广大的信号处理研究人员所认识和接受,循环平稳信号处理技术也被应用到更多领域,如波束形成<sup>[50~58,66~70,135]</sup>、盲信号分离<sup>[59~65]</sup>、盲通道均衡<sup>[90~92,136,140,142,145]</sup>、盲系统辨识<sup>[93,134,143~145]</sup>、信号分析与系统设计<sup>[72,86,94,95,97~99,107]</sup>等,还与高阶累积量理论相结合发展出了高阶循环平稳信号处理技术<sup>[73~82,112,113,139,141,154,155]</sup>,也有研究人员将小波信号处理技术、神经网络与谱相关理论相结合研究出了面向不同应用背景的性能更加优良的综合信号处理算法<sup>[85,137]</sup>。下面从六个不同的方面介绍循环平稳信号处理技术的发展概况。

#### 1. 快速、高精度谱相关函数估计方法

为解决谱相关分析方法在实际应用中面临的高精度、高分辨力谱相关函数估计问题,谱相关函数的估计方法和快速算法首先得到了快速的发展<sup>[21,32,100,101,108]</sup>。文献[21]研究了循环互谱的非参数估计方法,这是一种高分辨力的循环互谱估计方法,缺点是计算量较大。文献[32]研究了便于硬件直接实现的谱相关算法,该算法只利用信号 1 位量化信息,硬件实现极为方便,能满足实时计算要求,缺点是估计精度不高。文献[100]和[101]研究了循环多谱估计的问题,分别是基于中值滤波的多谱估计和非参数多谱估计,两种算法都能得到较高精度的多谱估计,缺点也是计算量较大。文献[108]给出了一种有效的循环谱分析快速实现算法。这些快速、高精度算法为谱相关理论的实际应用铺平了道路。

#### 2. 基于循环平稳特征的信号检测方法

随着研究的不断深入和应用的逐步扩展,具有更好检测性能和面向不同对象的循环检测方法也不断被研究出来<sup>[83,87~89,96,106,109~111,138]</sup>。文献[83]给出了一种循环平稳信号检测的快速实现算法,能在不降低检测性能的前提下极大地提高检测效率;文献[87]研究了阵列信号中基于最小均方差(MMSE)的循环平稳信号检测方法;文献[89]研究了非高斯噪声中的循环检测方法,该检测方法比一般循环检测方法更为稳健;文献[96]研究了未知噪声背景下循环平稳信号数量的估计方法;文献[106]研究了循环平稳特性的自由度(degrees of cyclostationarity),并且将该自由度用于信号的检测和参数估计,但该方法的检测和估计性能还有待验证;文献[108]研究了对数字调制信号的最佳检测问题;文献[110]分析了循环检测方法对直接序列和时间跳变低截获概率信号的检测性能;文献[111]给出了一种检测周期相

关的图形化方法；文献[138]详细分析了单循环频率循环检测器的检测性能。上述所有的检测方法都与一定的应用背景或应用对象相结合，虽然都利用了信号的谱相关特性，但不同的检测方法之间存在较大的差异。对所有循环平稳信号是否存在一种统一的最佳检测方法，或者说，对循环平稳信号的最佳滤波问题尚值得研究。

### 3. 基于谱相关的(盲)波束形成方法

由于循环平稳信号瞬时谱上下搬移一定频率值后得到的两个信号谱存在一定的相关性，使得谱相关理论在阵列波束形成上具有独特的优越性。这是因为利用上述相关性，将接收到的空间源信号搬移一定频率值后生成的信号可以作为阵列波束形成的参考信号。

最早将谱相关理论用于波束形成的是 B. G. Agee。他利用循环平稳信号的谱相关特性，用接收信号重构参考信号，在此基础上构建了统一的盲波束形成方法——SCORE (spectral self-coherence restoral)算法<sup>[149]</sup>。然而该方法的缺点是计算量大、收敛速度慢并且可能收敛到局部极大值点。针对上述问题，研究人员从不同的角度出发进行研究，几乎同时得到了多种计算量少、收敛速度快并且稳健的盲波束形成算法<sup>[50~58,66~70,135]</sup>。文献[51]给出了三种循环自适应波束形成(cyclic adaptive beamforming, CAB)算法，这些 CAB 算法都是通过求解带一定约束条件的最优化问题得到的，算法克服了 SCORE 的缺点，作者还给出了上述三种 CAB 算法的快速实现结构；文献[55]在 SCORE 算法的基础上提出了最小二乘 SCORE 算法——LS-SCORE，由于不需要进行复杂的矩阵特征值分解，并且采用了迭代方法来实现对最佳权的估计，算法计算量小，缺点是算法可能收敛到局部极小值点；文献[58,66,67]在 LS-SCORE 算法<sup>[55]</sup>的基础上研究了存在循环频率估计误差条件下稳健的盲自适应波束形成算法，通过迭代算法不断调整权值，能克服循环频率误差的影响，算法也能克服 LS-SCORE 可能收敛到局部极小值点的缺点；文献[56]研究了在循环检测的基础上实现阵列波束形成的方法；文献[52]~[54]研究在线性约束条件下基于谱相关特性的自适应波束形成方法，该约束条件能确保波束不会收敛到具有相同谱相关特性的干扰信号上，并且也能控制发射波束的旁瓣电平。文献[68]还研究了利用循环自适应波束形成技术跟踪移动声源的方法，文献[135]研究了利用循环波束形成技术进行 Ka 波段卫星通信的方法，这是循环波束形成方法的实际应用。

上述方法解决了如何快速有效地利用谱相关特性进行波束形成，下一步研究的重点将是如何解决算法实际使用要面临的问题，如解决通道不一致性及阵元位置误差等对波束形成的影响。



#### 4. 基于谱相关的盲信号分离方法

传统的盲信号分离方法是基于信号不同的统计特征和空间特性来实现对阵列输出信号的重构。而对于循环平稳信号，由于信号统计特征含有周期性，利用这种周期性可作为信号盲分离的基础<sup>[59-65]</sup>。文献[65]通过解带约束的似然函数最大值问题和解“同因分析(common factor analysis)”问题得到了两种自适应空时滤波结构。分析发现，这两种滤波算法实际上对应 SCORE 和共轭互 SCORE(conjugate cross SCORE)波束形成算法；文献[59]，[60]，[62]，[64]研究了基于信号二阶循环累积量的盲信号分离方法，得到了一种网络结构(network structure)的分离方法，该方法对信号的概率分布没有任何要求，能适用于各种特性噪声，并且性能要明显优于传统的基于高阶累积量的分离方法；文献[61]分析了传统二阶或高阶盲源分离算法在分离循环平稳信号时的性能；文献[63]分析了传统高阶盲源分离算法在受循环相关多径信号干扰时的性能。然而，已有的盲分离方法实际上并不是“全盲”的，还必须事先知道信号的循环频率。下一步要解决全盲条件下的循环平稳信号分离问题，研究将信号检测和信号分离相结合的新方法。研究基于高阶循环累积量的分离方法也是一个很重要的发展方向。

#### 5. 基于谱相关的系统辨识和盲通道均衡方法

循环平稳信号处理方法不仅具有很好的噪声和干扰抑制能力，并且能保留信号的相位信息，这一点与传统功率谱分析方法是不同的。循环平稳信号的二阶累积量可以用来辨识非最小相位系统，而传统的统计信号处理方法需要使用高阶累积量才能达到同样的目的<sup>[93,134,143-145]</sup>。文献[143]研究了通过输入循环平稳信号实现对线性和非线性系统的盲辨识方法；文献[145]讨论了基于二阶循环平稳特性的盲通道辨识和均衡方法；文献[93]，[134]，[144]研究了基于高阶循环累积量的线性和非线性系统辨识方法。

数字通信系统中为克服码间干扰，传统的做法是通过发送训练序列或根据信道的先验知识实现信道辨识和均衡。而当训练序列的获取不实际或成本太高时，盲信道均衡将起到重要的作用。同样，利用循环平稳信号能抑制噪声和保留相位信息的特点，基于谱相关特性的盲均衡方法也将具有广阔的应用前景<sup>[90-92, 136, 140, 142, 145]</sup>。

#### 6. 高阶循环累积量及其应用

零均值高斯过程三阶以上累积量恒等于零。因此，当信号含有加性高斯噪声时，理论上高阶累积量可以完全抑制高斯噪声的影响。而循环累积量具有很好的信号选择能力、适应不同特性噪声的能力以及保留信号信息全的特

点。高阶累积量与循环累积量相结合发展起来的高阶循环累积量理论在信号检测、参数估计、信道辨识和均衡以及波束形成等领域已得到极大的应用和发展<sup>[73~82, 112, 113, 139, 141, 154, 155]</sup>，高阶循环累积量理论也是循环平稳信号处理的一个重要的发展方向。

### 1.3 循环平稳信号处理研究进展及相关问题

循环平稳信号处理技术的真正应用和发展从 20 世纪 80 年代末期开始。经过近 20 年的发展，循环平稳信号处理技术已经在若干领域取得了丰硕的成果，但仍然存在许多问题没有得到较好解决，而且在许多与一般平稳信号分析与处理的平行领域还没有人过多涉足。

现阶段循环平稳信号处理理论的不足至少包括以下几个方面。

(1) 各种循环平稳信号检测及参数估计方法缺少统一的理论支持。到目前为止，针对不同信号环境及应用特点人们已提出了多种循环平稳信号检测及参数估计方法。一个很自然的问题就是这些不同方法之间是否存在某种关系，或者更进一步，是否有一种更基础的理论能将上述循环平稳信号检测及参数估计方法统一起来？这是本书第 3 章要讨论的问题。

(2) 对循环平稳信号多维处理方法的研究还是空白。已有的各种循环平稳信号处理方法都是在一维下进行的。考虑到时域、频域或者空域联合处理的要求，有必要研究多维循环平稳信号处理方法。这是本书第 4 章要讨论的问题。

(3) 还缺少对循环平稳信号分析和波形设计的数学工具。这是本书第 4 章要讨论的问题。

(4) 对循环平稳信号 DOA 估计方法的研究还不完善。例如，现有的方法都只考虑利用信号的二阶循环平稳特征，利用信号一阶或者高阶循环平稳特征的 DOA 估计方法的研究还是空白；利用多循环频率信号谱相关特征的 DOA 估计方法的研究也还是空白等。这是本书第 5 章要讨论的问题。

(5) 利用多循环频率信号谱相关特征的处理方法也不完善。如何利用多循环频率信号谱相关特征，现有的研究还只局限于信号检测和信号时差估计领域，在空域及多维联合处理领域，如何利用多循环频率信号谱相关特征还值得研究。这也是本书第 5 章要讨论的问题。

下面就上述问题展开详细说明。

#### 1.3.1 对循环平稳信号的线性时不变滤波

传统的统计信号处理方法在处理非平稳随机过程时通过引入均匀分布的随机相位而将非平稳过程转化为平稳过程，如式(1.5)所示。此时，对变换后的平稳过

程进行最佳滤波的滤波器应是一个线性时不变系统<sup>[8]</sup>。W. A. Gardner 研究了<sup>[1]</sup>对循环平稳信号的线性周期时变滤波器, 该系统的时变参数与信号的循环平稳特性密切相关。并且证明, 这种线性时变处理的性能要优于传统的线性时不变处理方法。1993 年, W. A. Gardner 在频域又重新研究了对循环平稳信号的滤波问题<sup>[31]</sup>, 形成了一套 FRESH 滤波理论(frequency shift, FRESH)。该滤波理论的依据是循环平稳信号的信号谱平移特定值后得到的信号谱与源信号谱仍是相关的。因此, 通过对源信号谱与信号平移谱适当的加权处理就能增强或减弱特定频率分量的信号。

然而, 不管是线性周期时变滤波理论还是 FRESH 滤波理论, 在实际中并没有得到广泛应用, 这主要是因为具有时变特征的滤波器在使用时存在许多不确定性因素, 并且计算量巨大。正如文献[1]和[31]的研究结果, 对循环平稳信号的时变滤波器是由多处理通道同相叠加实现的。理论上, 通道数目应是无穷的, 并且只有各通道严格同相叠加才能达到最佳的滤波性能。如果某通道相位失配, 整个滤波器的滤波性能会下降, 甚至可能失效。采用大量处理通道并严格做到各通道幅相特性一致给使用提出了很高的要求, 不便于实际应用。

对循环平稳信号的最佳滤波和最佳检测从某种程度上来说是同一个问题。一种实际可行的方法是研究基于信号循环平稳特征的线性时不变滤波器。为充分利用信号的循环平稳特性, 要求滤波器不能损失信号的谱相关特征, 并且能满足一定的要求, 比如使滤波器输出信噪比达到最大。

上述对循环平稳信号的线性时不变滤波理论可望起到和匹配滤波理论相似的作用, 能将现有的各种循环平稳信号检测和参数估计方法统一起来。

### 1.3.2 循环平稳信号时频二维联合处理

仔细分析循环平稳信号处理技术的发展过程不难看出, 已有的各种循环平稳信号处理方法实际上都是在—维下进行的, 如基于信号循环平稳性的 DOA 估计方法和时差估计方法等。实际应用中, 有许多场合需要进行多个信号参数的估计, 比如接收信号多普勒频移和到达时间差、空间源信号频率和到达角, 以及接收信号极化特征、频率、二维到达角等。对于平稳随机过程, 现代信号处理已经取得了相当大的成就, 发展了理论体系完善的多维信号处理方法, 比如针对具有频移信号的指数加权处理技术(由—维匹配滤波理论发展起来的时频二维相关处理技术)、基于模糊函数理论的最佳信号波形设计技术、空时自适应信号处理技术(STAP)、频率/二维到达角/极化等多参数联合估计技术等<sup>[162~165]</sup>。同样, 多维联合处理也将是循环平稳信号处理技术的一个很重要的发展方向。

当然, 直接将—维循环平稳信号处理方法推广到多维存在一定的困难, 特别是涉及信号存在未知频移需要进行频率补偿的情况。这是因为, 信号的频移会改

变接收信号的谱相关特性，直观来说就是会改变信号的循环频率，使得原本在一定循环频率处循环相关的两个信号因为循环频率的改变而不再循环相关。再对信号进行简单的指数加权处理无法补偿频移带来的影响。这一点与传统的统计信号处理方法是不同的。

### 1.3.3 对循环平稳信号的空间谱估计方法

最早对循环平稳信号 DOA 估计方法开展研究的是 W. A. Gardner。他通过计算阵列接收信号的循环自/互相关函数，并计算相应的协方差矩阵，得到了基于 MUSIC 或 ESPRIT 实现的高分辨信号到达角估计方法<sup>[26, 27]</sup>，W. A. Gardner 教授称之为 Cyclic MUSIC 方法或 Cyclic ESPRIT 方法。然而，不管是 Cyclic MUSIC 方法还是 Cyclic ESPRIT 方法，它们仍然要求信号必须是窄带的。G. H. Xu 等人重新研究了阵列信号模型，在不进行任何信号模型约束的情况下研究得到了基于信号谱相关特性的信号子空间拟合 DOA 估计方法，称之为 SC-SSF 估计方法<sup>[36, 119]</sup>。该方法一个显著的特点就是不仅能适用于窄带信号，对宽带信号同样成立。总的来说，目前国内外对利用信号循环平稳特性进行 DOA 估计的研究主要集中在下面几个方向。

#### 1. Cyclic MUSIC(或 Cyclic ESPRIT)估计方法

由于利用了信号的谱相关特性，Cyclic MUSIC 估计方法具有信号选择能力，这使得该方法能突破传统方法源信号数必须小于阵元数的限制，对阵元数要求大大降低；同时，Cyclic MUSIC 方法具有较强的适应不同特性噪声的能力，并且估计性能不亚于传统 MUSIC 估计方法。目前，国内外对该方法的研究已经比较完善，包括估计算法的实现、估计的 Cramer-Rao 限及其应用(对相干源的处理等)，详见参考文献[26]、[27]、[34]、[35]、[114]~[127]。该方法的缺点是要求信号必须是窄带的。

#### 2. 基于信号谱相关特性的信号子空间拟合 DOA 估计方法

SC-SSF(spectral correlation-signal subspace fitting)方法直接对阵列接收信号计算循环自相关函数，得到阵列输出循环自相关函数矢量。由于该计算过程并不改变方向矩阵，将阵列输出循环自相关矢量用方向矩阵和输入信号的循环自相关矢量表示，可以得到形式和传统 DOA 估计方法一样的阵列模型，所不同的只是用循环自相关矢量取代了接收信号矢量。根据该信号模型构造数据矩阵，并结合 MUSIC(或 ESPRIT)算法即可估计出信号到达角。由于该方法不需要对信号带宽作出任何约束，因此不仅适用于对窄带信号的处理，同样适用于对宽带信号的处理，克服了 Cyclic MUSIC 方法的不足。目前，国内外对该方法的研究主要集

中在估计方法的原理、与 Cyclic MUSIC 方法的比较及对相干源的处理等方面<sup>[120]</sup>。对 SC-SSF 算法的研究还不完善,至少包括两个方面的内容,一是没有明确协方差数据矩阵的构造方法,不便于实际应用;二是对估计方法的估计性能缺少定量分析。

### 3. 基于高阶循环累积量的 DOA 估计方法

Cyclic MUSIC 和 SC-SSF 算法都是通过对阵列接收信号循环自相关函数的处理来实现到达角估计的,只利用了信号的二阶循环平稳特性。随着计算速度的不断提高和超大规模集成电路的发展,性能优良但计算量大的高阶累积量方法在信号检测、参数估计等领域获得了巨大的发展,成为现代信号处理领域一个极其活跃的研究课题。将高阶累积量方法与信号循环平稳特性相结合发展出了高阶循环处理方法。该处理方法集成了高阶累积量方法和循环处理方法二者的优点,成为目前循环平稳信号处理领域一个前沿性课题,其中一个应用就是基于高阶循环累积量的 DOA 估计方法,目前该领域的研究尚处于起步阶段<sup>[141, 162]</sup>。

### 4. 其他方面的研究

除了上述提到的研究内容外,还有文献研究了近场条件下对循环平稳信号的 DOA 估计方法<sup>[121]</sup>、存在阵列误差条件下的对循环平稳信号的 DOA 估计方法<sup>[118]</sup>、多径干扰条件下对循环平稳信号的 DOA 估计方法<sup>[114, 123]</sup>,以及基于信号循环平稳性 DOA 估计方法中的最小冗余阵列结构<sup>[126]</sup>等。

基于 SC-SSF 的 DOA 估计方法与 Cyclic MUSIC 方法相比由于能适应任意带宽信号,并且也具有较好的性能,成为目前 DOA 估计领域的一个研究热点。本文将根据 SC-SSF 方法存在的两个问题展开研究。

同时,现有的对循环平稳信号的 DOA 估计方法都是基于信号二阶循环平稳特性研究得到的。实际上,还有很多信号具有一阶循环平稳特性。本文还将就利用一阶循环平稳特性的 DOA 估计方法展开研究。

#### 1.3.4 利用多循环频率信号信息的循环平稳信号处理技术

现有的利用信号循环平稳特征的 DOA 估计方法,如 Cyclic MUSIC、SC-SSF 等,都只利用了单个循环频率的信号谱相关特征。实际上,大多数循环平稳信号都具有多个循环频率。为充分利用信号的循环平稳性,有必要研究多循环频率 DOA 估计方法。

不仅是 DOA 估计,在进行信号检测、信号多参数估计或者联合估计时都应考虑利用多个循环频率信号信息的处理方法,以期达到最佳的处理效果。这也将

是循环平稳信号处理技术的一个发展方向。

## 1.4 展 望

循环平稳信号处理理论与技术已日益成熟，但循环平稳信号处理理论和方法仍然是不完善的。结合实际应用需求和我们多年的工作体会，进一步的研究需要解决以下问题，供广大科技工作者参考。

### 1. 对循环平稳信号时频联合估计方法的进一步完善

书中讨论的循环平稳信号时频联合估计方法是在比较理想的情况下得到的，在实际信号环境下，还需要研究以下几个问题。

(1) 对时变多普勒的考虑。时变多普勒会影响到循环平稳信号谱相关函数的计算精度，从而对循环平稳信号时差和频差的估计产生不可预知的影响。这是因为，进行高精度的谱相关函数估计需要较长时间的信号积累，并且要求多普勒频率在该积累时间内是固定不变的。

当多普勒频率具有时变特征时，要保证对谱相关函数的估计精度，必须研究有效的多普勒补偿方法。

(2) 对幅相特性不一致的考虑。通常，在分析循环平稳信号时差/频差估计时，特别是对双站时差或频差进行估计时，都默认双站接收机具有一致的幅相特性。当存在幅相特性不匹配时，需要研究对幅相不一致的补偿方法。

(3) 对复杂调制信号的考虑。随着信号谱的逐渐展宽，许多新的更为复杂的调制信号也被越来越多地应用到实际系统中。在利用本书介绍的时频联合估计方法处理这些复杂调制信号前，先要对这些复杂调制信号的循环平稳特性进行分析。

### 2. 对循环空间谱估计理论的进一步完善

根据空间谱估计理论的研究现状，并结合循环平稳信号的特殊性，循环空间谱估计理论还需要研究解决以下几个问题。

(1) 对循环频率误差稳健的循环空间谱估计方法。循环频率估计误差对协方差数据矩阵的估计精度有较大的影响，将导致空间谱估计性能下降，甚至失效。研究对循环频率估计误差稳健的空间谱估计方法，是目前该领域的一个研究热点。

(2) 相干源及多径干扰对循环空间谱估计方法的影响。多径干扰和相干源会降低协方差数据矩阵的秩，使得循环空间谱估计方法不能给出所有空间源的方向，存在“漏估”的问题。相干源和多径干扰对循环空间谱估计方法的影响，以及针

对相干源和多径干扰有效的循环空间谱估计方法也是亟待研究解决的问题。

(3) 阵元位置误差及通道不一致性对循环空间谱估计方法的影响。阵元位置误差和通道不一致都会引入相位误差,该相位误差会直接影响循环空间谱估计得到的角度的准确性。需要研究的是,与传统空间谱估计方法相比,阵元位置误差及通道不一致性对循环空间谱估计方法的影响有什么特点,以及怎样消除或部分补偿这种影响。

(4) 循环空间谱估计快速算法。循环空间谱估计方法较传统的空间谱估计方法计算量要大,主要表现在谱相关函数的计算上。研究循环空间谱估计快速算法需要从两个方面着手,一是研究快速高精度的谱相关函数估计算法,二是研究快速的空间谱估计算法。

### 3. 基于高阶循环累积量的循环平稳信号处理方法

将高阶累积量方法与循环平稳信号模型相结合的高阶循环累积量理论同时具有二者的优点,缺点是计算量大。

如何将高阶循环累积量用于循环平稳信号的检测、参数估计、通道均衡、系统辨识等领域中,并研究相应的快速算法,是循环平稳信号处理的一个重要研究方向。

### 4. 循环平稳信号多维处理方法

类似于传统的平稳信号多维联合处理模型和方法,循环平稳信号方向(包括方位和俯仰)、频率、极化等联合估计方法以及高阶循环累积量方法在其中的应用,也是该领域的研究热点。

## 小 结

### 1. 循环平稳信号处理概述

循环平稳信号处理作为现代信号处理一个全新的前沿领域,有许多不同于一般信号处理的概念和方法,掌握这些概念和方法是正确理解和应用循环平稳信号处理理论的前提。第2章对循环平稳信号处理理论的一些基本概念进行了阐述,为便于读者理解,还就一些概念和方法给出了直观的仿真和计算结果。主要内容包括:系统地阐述了谱相关理论的基本概念,包括一阶循环平稳和循环均值、二阶循环相关和谱相关、谱相关函数估计方法以及谱相关分析的特点等;对常见典型信号的谱相关特性进行了仿真计算;仿真说明了谱相关分析的信号分辨性能(signal-selectivity);分析了循环平稳随机过程与一般平稳随机过程循环互相关函数

的统计特性,包括平稳性分析和数据消失特性。通过对这一章的学习,读者能较全面地掌握循环平稳信号处理的基本概念和方法。

## 2. 循环相关匹配滤波理论及其应用

本章主要介绍对循环平稳信号的线性时不变滤波方法,该滤波方法将现有的各种检测方法和参数估计方法有机地结合起来。首先,介绍了对循环相关函数的循环相关匹配滤波器的设计方法。然后,对循环相关匹配滤波器(组)的滤波性能进行了定量分析,并与传统匹配滤波器进行了比较。还给出了在非合作条件下循环相关匹配滤波器的设计方法。在此基础上讨论了基于循环相关匹配滤波的信号检测及时延估计方法,以及基于循环相关匹配滤波的盲信号检测及时差估计方法。

## 3. 循环模糊函数及其应用

本章主要讨论存在频移失配时对循环平稳信号的最佳二维滤波问题。首先,研究了对循环平稳信号的时差-多普勒联合估计问题,得到了单循环频率二维时频联合估计方法,在此基础上提出了循环(互)模糊函数的概念。利用循环模糊函数分析了典型循环平稳信号的时间、频率分辨力,并用循环模糊函数对循环平稳信号的最佳波形设计进行了讨论,给出了具有良好时间、频率分辨力的信号波形应满足的条件。在考虑利用多循环频率信号信息的条件下还研究了多循环频率时频联合估计问题,并将单循环频率循环模糊函数推广得到了多循环频率循环模糊函数组。在全盲条件下定义了广义循环模糊函数(组),并讨论了它们在信号检测及参数估计中的应用。随后,对各种参数估计性能进行了详细的理论分析,推导得到了各种参数估计方法的估计方差。还给出了一个应用实例,即将多循环频率时频二维联合处理方法用于基于非合作辐射源目标探测系统的信号处理。

## 4. 宽带循环平稳信号空间谱估计方法

本章主要介绍对循环平稳信号的 DOA 估计方法,包括基于信号一阶循环平稳特性的 DOA 估计方法、基于循环互相关的 DOA 估计方法、多循环频率 DOA 估计方法以及针对 SC-SSF 方法的改进算法——基于加权循环谱的 DOA 估计方法,并分析各种单/多循环频率 DOA 估计方法的估计性能。

## 参 考 文 献

- 1 Gardner W A, Franks L E. Characterization of cyclostationary random signal processes. IEEE Trans Information Theory, 1975, IT-21(1): 4~14
- 2 Gardner W A. Statistical Spectral Analysis: A Nonprobabilistic Theory. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1987



- 3 Gardner W A. Spectral correlation of modulated signals: part I— analog modulation. *IEEE Trans. Commun.*, 1987, COM-35(6): 584~594
- 4 Gardner W A. Spectral correlation of modulated signals: part II—digital modulation. *IEEE Trans. Commun.*, 1987, COM-35(6): 595~601
- 5 Gardner W A. Exploiting spectral redundancy in cyclostationary signals. *IEEE ASSP Magazine*, 1991, 8(2): 14~36
- 6 Gardner W A. An introduction to cyclostationary signals. *Cyclostationarity in communications and signal processing*, Gardner W A, Ed., IEEE Press, 1994
- 7 张贤达等. 非平稳信号分析与处理. 北京: 国防工业出版社, 1998
- 8 Hurd H. An investigation of periodically correlated stochastic processes. Ph. D. dissertation, Duke Univ., Durham, N. C., 1969
- 9 Ogura H. Spectral representation of a periodic nonstationary random process. *IEEE Trans. Information Theory*, 1971, IT-17(3): 143~149
- 10 Gudzenko L I. On periodic nonstationary process. *Radio Eng. Electron. Phys. (USSR)*, 1959, 4(6): 220~224
- 11 Gladyshev E G. Periodically and almost periodically correlated random processes with continuous time parameter. *Theory Prob. Appl. (USSR)*, 1963, pp. 173~177
- 12 Brelsford W M. Probability predictions and time series with periodic structure. Ph. D. dissertation, Johns Hopkins Univ., Baltimore, Md. 1967
- 13 Bennett W R. Statistics of regenerative digital transmission. *Bell Syst. Tech. J.*, 1958, 37(12): 1501~1542
- 14 Gardner W A. Representation and estimation of cyclostationary processes. Ph. D. dissertation, Univ. of Massachusetts, Amherst, 1972
- 15 Gardner W A. Structural characterization of locally optimum detectors in terms of locally optimum estimators and correlators. *IEEE Trans. Information Theory*, 1982, IT-28(11): 924~932
- 16 Gardner W A. *Introduction to Random Processes with Application to Signals and Systems*. New York: Macmillan, 1985
- 17 Gardner W A. The spectral correlation theory of cyclostationary time-series. *Signal Processing [EURASIP]*, 1986, 11(1): 13~36
- 18 Gardner W A. Measurement of spectral correlation. *IEEE Trans. ASSP*, 1986, ASSP-34(10): 1111~1123
- 19 ADA258928. The advantage of cyclic spectral analysis. December 1991
- 20 ADA303107. Cyclostationary spectral analysis of typical Satcom signals using the FFT accumulation method. December 1995
- 21 Sadler B M, Dandawate A V. Nonparametric estimation of the cyclic cross spectrum. *IEEE Trans. Information Theory*, 1998, 44(1): 351~358
- 22 Gardner W A. Rice's representation for cyclostationary processes. *IEEE Trans. Commun.*, 1987, COM-35(1): 74~78
- 23 Brown W A. On the theory of cyclostationary signals. Ph.D. Dissertation. Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of California. Davis, September 1987
- 24 Gardner W A, Chen C K. Interference-tolerant time-difference-of-arrival estimation for modulated signals. *IEEE Trans. ASSP*, 1988, 36(9): 1385~1395
- 25 Gardner W A. Signal interception: A unifying theoretical framework for feature detection. *IEEE Trans. Commun.*, 1988, COM-36(8): 897~906
- 26 Gardner W A. Simplification of MUSIC and ESPRIT by exploitation of cyclostationarity. *Proc. IEEE*, 1988, 76(7): 845~847
- 27 Schell S V, Gardner W A. Cyclic MUSIC algorithms for signal-selective direction finding. in *Proc. ICASSP 1989 Conf.*, 1989, 4: 2278~2281
- 28 Spooner C M et al. Robust feature detection for signal interception. *IEEE Trans. Communications*, 1994, 42(5): 2165~2173
- 29 Dandawate V et al. Statistical tests for presence of cyclostationarity. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1994, 42(9):

- 2355~2365
- 30 Napolitano, Spooner C M. Cyclic spectral analysis of continuous-phase modulated signals. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2001, 49(1): 30~44
  - 31 Gardner W A. Cyclic wiener filtering: theory and method. *IEEE Trans. Commun.*, 1993, COM-41(1): 151~163
  - 32 Gardner W A, Roberts R S. One-bit spectral-correlation algorithms. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1993, 41(1): 423~427
  - 33 Shamsunder S, Giannakis G B. Signal selective localization of nonGaussian cyclostationary sources. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1994, 42(10): 1860~1864
  - 34 Izzo L, Paura L, Poggi G. An interference-tolerant algorithm for localization of cyclostationary signal sources. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1992, 40(7): 1682~1686
  - 35 Mauck K D. Wideband Cyclic MUSIC. in *Proc. ICASSP' 1993*, vol. IV, Minneapolis, MN. 1993, 288~291
  - 36 Xu G H, Kailath T. Direction-of-arrival estimation via exploitation of cyclostationarity—a combination of temporal and spatial processing. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1992, 40(7): 1775~1785
  - 37 Enserink S, Cochran D. On detection of cyclostationary signals. *ICASSP-1995*, 2004~2007
  - 38 Gardner W A, Spooner C M. Signal interception: performance advantages of cyclic-feature detectors. *IEEE Trans. Communications*, 1992, 40(1): 149~159
  - 39 Enserink S, Cochran D. Cyclostationary feature detector. *IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers 1994*, 806~810
  - 40 Fong G, Gardner W A, Schell S V. An algorithm for improved signal-selective time-difference estimation for cyclostationary signals. *IEEE Signal Processing Letters*, 1994, 1(2): 38~40
  - 41 Gardner W A, Chen C K. Selective source location by exploitation of spectral coherence. *4th Annual ASSP Workshop on Spectrum Estimation and Modeling*, 1988, 271~276
  - 42 Gardner W A, Chen C K. Signal-selective time-difference-of-arrival estimation for passive location of man-made signal sources in highly corruptive environments, part 1: Theory and method. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1992, 40(5): 1168~1184
  - 43 Chen K, Gardner W A. Signal-selective time-difference-of-arrival estimation for passive location of man-made signal sources in highly corruptive environments, part 2: Algorithms and performance. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1992, 40(5): 1185~1197
  - 44 Huang Z T et al. Joint estimation of doppler and time-difference-of-Arrival exploiting cyclostationary property, *IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, 2002, 149(4), 161~165
  - 45 Izzo L, Napolitano A, Paura L. Modified cyclic methods for signal selective TDOA estimation. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1994, 42(11): 3294~3298
  - 46 Gardner W A, Spooner C M. Detection and source location of weak cyclostationary signals: simplifications of the maximum-likelihood receiver. *IEEE Trans. Communications*, 1993, 41(6): 905~916
  - 47 Spooner M, Chen C, Gardner W A. Maximum likelihood two-sensor detection and TDOA estimation for cyclostationary signals. *Sixth Multidimensional Signal Processing Workshop*, 1989, 119~120
  - 48 Gardner W A et al. Comparison of autocorrelation and cross-correlation methods for signal-selective TDOA estimation. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1992, 40(10): 2606~2608
  - 49 Gelli G, Luciano Izzo, Luigi Paura. Cyclostationarity-based signal detection and source location in non-Gaussian noise. *IEEE Trans. Communications*, 1996, 44(3): 368~375
  - 50 Castedo L, Figueiras-Vidal A R. An adaptive beamforming technique based on cyclostationary signal properties. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1995, 43(7): 1637~1650
  - 51 Wu Q, Wong K M. Blind adaptive beamforming for cyclostationary signals. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1996, 44(11): 2757~2767
  - 52 Castedo L, Tseng C Y, Griffiths L J. A new cost function for adaptive beamforming using cyclostationary signal properties. *ICASSP-1993*, 284~287

- 53 Castedo L, Tseng C Y, Figueiras A R et al., Linearly-constrained adaptive beamforming using cyclostationary signal properties. ICASSP-1994, 249~252
- 54 Chevalier P, Maurice A. Constrained beamforming for cyclostationary signals. ICASSP-1997, 3789~3792
- 55 Yu S J, Lee J H. Adaptive array beamforming for cyclostationary signals. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1996, 44(7): 943~953
- 56 Xin J, Tsuji H, Hase Y et al. Array beamforming based on cyclic signal detection. 48th IEEE Vehicular Technology Conference, 1998, 890~894
- 57 Burns P, Ding Z. Robustification of cyclostationary array processing techniques. ICASSP-1995, 1589~1592
- 58 Lee J H, Lee Y T, Shih W H. Efficient robust adaptive beamforming for cyclostationary signals. IEEE Trans. Signal Processing, 2000, 48(7): 1893~1901
- 59 Meraim K, Xiang Y, Hua Y B. Blind source separation using second-order cyclostationary statistics. Information, Decision and Control, IDC99. Proceedings 1999, 321~326
- 60 Liang Y C, Leyman A R, Chin F. New criteria for blind source separation using second-order cyclic statistics. Circuits Systems Signal Processing, 2000, 19(1): 43~58
- 61 Chevalier F O. On the behavior of current second and higher order blind source separation methods for cyclostationary sources. IEEE Trans. Signal Processing, 2000, 48(6): 1712~1725
- 62 Liang Y C, Leyman A R, Soong B H. Blind source separation using second-order cyclic-statistics. IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, 1997, 57~60
- 63 Veronique P C, Pierre C. Behavior of higher order blind source separation in the presence of cyclostationary correlated multipaths. Proceedings of IEEE Signal Processing Workshop on Higher-order Statistics, 1997, Los Alamitos, CA, USA, 363~367
- 64 Liang Y C, Leyman A R, Soong B H. A network structure approach to blind source separation using second order cyclic statistics. Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 1997, 2549~2551
- 65 Schell S V, Gardner W A. Maximum likelihood and common factor analysis-based blind adaptive spatial filtering for cyclostationary signals. ICASSP-93, 27~30, 1993, 292~295
- 66 Lee J H, Lee Y T. Adaptive beamforming using cyclic signals in the presence of cycle frequency error. International Symposium o Antennas and Propagation, 1996, 1180~1183
- 67 Lee J H, Lee Y T. Robust adaptive array beamforming for cyclostationary signals under cycle frequency error. IEEE Trans. Antennas and Propagation, 1999, 47(2): 233~241
- 68 Vo B, Ma N, Ching P C et al., Tracking moving speech source using cyclic adaptive beamforming. Electronics Letters, 2000, 36(19): 1666~1668
- 69 Yu S J, Ueng F B. Implementation of cyclostationary signal-based adaptive arrays. Signal Processing, 2000, 80: 2249~2254
- 70 Gelli G. Power and timing parameter estimation of multiple cyclostationary signals form sensor array data. Signal Processing, 1995, 42: 97~102
- 71 Brejesh Lall, Joshi S D, Bhatt R K P. Second-order statistical characterization of the filter bank and its elements. IEEE Trans. Signal Processing, 1999, 47(6): 1745~1749
- 72 Montanari G M, Verrazzani L. Estimation of chirp radar signals in compound-Gaussian clutter: a cyclostationary approach. IEEE Trans. Signal Processing, 2000, 48(4): 1029~1039
- 73 Dandawate V, Giannakis G B. Detection and classification of cyclostationary signals via cyclic-HOS: a unified approach. SPIE, 1992, 1770: 315~326
- 74 Gardner W A, Spooner C M. The cumulant theory of cyclostationary time-series, part I: foundation. IEEE Trans. Signal Processing, 1994, 42(12): 3387~3408
- 75 Spooner C M, Gardner W A. The cumulant theory of cyclostationary time-series, part II: development and applications. IEEE Trans. Signal Processing, 1994, 42(12): 3409~3429
- 76 Dandawate V, Giannakis G B. Nonparametric polyspectral estimators for kth-order (almost) cyclostationary

- processes. *IEEE Trans. Information Theory*, 1994, 40(1): 67~84
- 77 Dandawate A V. Exploiting cyclostationary and higher-order statistics in signal processing: [Ph. D. thesis] University of Virginia, 1993
- 78 Izzo L, Napolitano A. Higher-order cyclostationarity properties of sampled time-series. *Signal Processing*, 1996, 54: 303~307
- 79 Izzo L, Napolitano A. The higher-order theory of generalized almost-cyclostationary time series. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1998, 46(11): 2975~2989
- 80 Spooner C M. Higher-order statistics for nonlinear processing of cyclostationary signals. *Cyclostationarity in Communications and Signal Processing*, Ch. 2 1994, 91~167 (AD-A290 442/3/HDM)
- 81 Izzo L, Napolitano A. Higher-order statistics for Rice's representation of cyclostationary signals. *Signal Processing*, 1997, 56(3): 279~292
- 82 Chevalier F P. On the fourth-order cumulant estimation for the HO blind separation of cyclostationary sources. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 12~15 May 1998, 2313~2316
- 83 Yeung K, Gardner W A. Search-efficient methods of detection of cyclostationary signals. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1996, 44(5): 1214~1223
- 84 Schell S V, Gardner W A. Blind adaptive spatiotemporal filtering for wide-band cyclostationary signals. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1993, 41(5): 1961~1964
- 85 Rice B F, Smith S R, Threlkeld R A. A neural network classifier for cyclostationary signals. *ICASSP-1994*, 165~168
- 86 Goerlich J, Bruckner D, Richter A et al. Signal analysis using spectral correlation measurement. *Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 1998, 1313~1318
- 87 Xin J, Tsuji H, Yoshimoto S. Minimum MSE-based detection of cyclostationary signals in array processing. *IEEE Signal Processing Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications*, 1997, 169~172
- 88 Enserink S, Cochran D. On the detection of cyclostationary signals. *ICASSP-95 (International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing)*, 1995, 2004~2007
- 89 Rostaing P, Thierry E, Pitarque T. Cyclic detection in a nonwhite Gaussian noise. *ICASSP-95*, 1995, 2008~2013
- 90 Petersen B R, Falconer D D. Exploiting cyclostationary subscriber-loop interference by equalization. *IEEE Global Telecommunications Conference and Exhibition*, 1990, 1156~1160
- 91 Altuna J, Mulgrew B. A comparison of cyclostationary blind equalization techniques. *IEE Colloquium on Multipath Countermeasures* 1996, 8/1~8/6
- 92 Desbouvries C F et al. Blind equalization in the presence of jammer and unknown noise: solutions based on second-order cyclostationary statistics. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1998, 46(1): 259~263
- 93 Izzo F L, Napolitano A. A computationally efficient and interference tolerant nonparametric algorithm for LTI system identification based on higher order cyclostationarity. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2000, 48(4): 1040~1051
- 94 Hurd L. Spectral correlation of randomly jittered periodic functions of two variables. *29th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 1995, 500~505
- 95 Zivanovic G D. On the instantaneous frequency of cyclostationary random signal. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1991, 39(7): 1604~1610
- 96 Schell S V, Gardner W A. Detection of the number of cyclostationary signals in unknown interference and noise. *Proceedings of Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 1990, 473~477
- 97 Ding Z. Cyclostationary signal processing in digital communication system. ADA365285/XAB
- 98 Frederick T, Erdol N. Time-frequency estimation for cyclostationary signals. *ICASSP-1996*, 2928~2931
- 99 Nicholson D L, Sullivan M C. Noninterfering communications using chip-rate keying and a cyclostationary demodulator. *IEEE Military Communications Conference*, 1991, 606~609
- 100 Napolitano, Spooner C M. Median-based cyclic polyspectrum estimation. *IEEE Trans. Signal Processing*, 48(5):

- 1462~1466
- 101 Dandawate et al. Nonparametric cyclic-polyspectral analysis of AM signals and processes with missing observations. *IEEE Trans. Information Theory*, 1993, 39(6): 1864~1876
- 102 Schell S V. Asymptotic moments of estimated cyclic correlation matrices. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1995, 43(1): 173~180
- 103 Dandawate A V et al. Asymptotic theory of mixed time averages and Kth-order cyclic-moment and cumulant statistics. *IEEE Trans. Information Theory*, 1995, 41(1): 216~232
- 104 Yi Y H et al. Fully blind estimation of time delays and spatial signatures for cyclostationary signals. *Electronics Letters*, 1998, 34(25): 2378~2380
- 105 Knapp H et al. The generalized correlation method for estimation of time delay. *IEEE Trans. ASSP*, 1976, ASSP-24(8): 320~327
- 106 Zivanovic G D et al. Degrees of cyclostationarity and their application to signal detection and estimation. *Signal Processing*, 1991, 22: 287~297
- 107 Gardner W A. The role of spectral correlation in design and performance analysis of synchronizers. *IEEE Trans. Communications*, 1986, COM-24: 1089~1095
- 108 Roberts R S et al. Computationally efficient algorithms for cyclic spectral analysis. *IEEE ASSP Magazine*, 1991, 8(4): 38~49
- 109 Krasner N F. Optimal detection of digitally modulated signals. *IEEE Trans. Communications*, 1982, COM-30(5): 885~895
- 110 Polydoros et al. Detection performance considerations for direct-sequence and time-hopping LPI waveforms. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1985, SAC-3(9): 727~744
- 111 Hurd L et al. Graphical methods for determining the presence of periodic correlation. *J. Time series Anal.*, 1991, 12(4): 337~350
- 112 Gardner W A. Spectral characterization of N-th order cyclostationarity. *Proceedings of the IEEE Fifth ASSP Workshop on Spectrum Estimation and Modeling*. Rochester, NY, 10~12 Oct. 1990, 251~255
- 113 Gardner W A et al. Higher-order cyclostationarity, cyclic cumulant, and cyclic polyspectra. *Proceedings of the 1990 International Symposium on Information Theory and its Applications*, Hawaii, 1990
- 114 Schell S V et al. Signal-selective high-resolution direction finding in multipath. *Proc. IEEE ICASSP (Albuquerque, NM)*, 1990, 2667~2670
- 115 Schell S V. Exploitation of spectral correlation for signal-selective direction finding. Ph. D dissertation, Dept. of Elec. Eng., Comput. Sci., Univ. California, Davis, 1990
- 116 Schell S V et al. Cramer-Rao lower bound for parameters of Gaussian cyclostationary signals. *Proc. Int. Symp. Inform. Theory, Applicat. (Waikiki, HI)*, 1990, 255~258
- 117 Schell S V et al. Cramer-Rao lower bound for directions of arrival of Gaussian cyclostationary signals. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1992, 38(7): 1418~1422
- 118 Schell S V et al. Robustness of direction-finding methods for cyclostationary signals in the presence of array calibration error. *Proc. IEEE 6th Signal Processing Workshop Statist. Signal, Array Processing (Victoria, BC, Canada)*, 1992, 346~349
- 119 Xu G et al. Array signal processing via exploitation of spectral correlation-A combination of temporal and spatial processing. *Proc. 23rd Asilomar Conf. Signals, Syst., Comput. (Pacific Grove, CA)*, 1989, 945~949
- 120 Lee Y T et al. Direction-finding methods for cyclostationary signals in the presence of coherent sources. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 2001, 49(12): 1821~1826
- 121 Lee H et al. Estimating the bearing of near-field cyclostationary signals. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2002, 50(1): 110~118
- 122 Schell S V. An overview of sensor array processing for cyclostationary signals. In *Cyclostationarity in Communications and Signal Processing*, New York: IEEE, 1994, 168~239

- 123 Xin et al. Linear prediction approach to direction estimation of cyclostationary signals in multipath environment. *IEEE Trans. Signals Processing*, 2001, 49(4): 710~720
- 124 Lee Y T et al. A novel direction-finding method for cyclostationary signals. *Signal Processing*, 2001, 81: 1317~1323
- 125 Schell S V et al. Performance analysis of the cyclic MUSIC method of direction estimation for cyclostationary signals. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1994, 42(11): 3043~3050
- 126 Gelli G et al. Minimum-redundancy linear arrays for cyclostationarity-based source location. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1997, 45(10): 2605~2608
- 127 Shamsunder S et al. Signal selective location of nonGaussian cyclostationary sources. *IEEE Trans. Signal Processing*, 1994, 42(10): 2860~2867
- 128 Abhayapala T D et al. Coherent broadband source localization by modal space processing. 10th International Conference on Telecommunications, 2003
- 129 Ghanem R B et al. Spherical Bessel functions and explicit quadrature formula. *MATHEMATICS OF COMPUTATION*, 1997, 66(1): 289~296
- 130 Huang Z T et al. A direction-of-arrival estimation method for source signals exploiting 1st order cyclostationarity property. CIE International Conference on Radar, Beijing, 2001, 814~818
- 131 Huang Z T et al. DOA estimation method based on weighted cyclic spectrum. CIE International Conference on Radar, Beijing, 2001, 1108~1111
- 132 Brack D. Maximum likelihood estimation of time difference of arrival for cyclostationary process. Ph. D. dissertation, Arizona State University, 1997
- 133 Frederick T J. Time-frequency estimation for cyclostationary signals. Ph. D. dissertation, Florida Atlantic University, 1997
- 134 Prakriya S. Blind identification of nonlinear systems based on higher order cyclic spectra. Ph. D. dissertation, University of Toronto (Canada), 1997
- 135 Lusina P J. Ka-broadband satellite communication using cyclostationary parabolic beamforming. M. S. dissertation, Queen' s University at Kingston (Canada), 1997
- 136 Halford S D. Blind channel-equalization for wireless communications. Ph. D. dissertation, University of Virginia, 1997
- 137 Sen. Multiresolution modeling of cyclostationary processes using the wavelet transform. Ph.D. dissertation, University of Massachusetts, 1997
- 138 Reinking J T. Performance analysis of single-cycle detectors with applications to signal presence detection. Ph. D. dissertation, University of Kansas, 1995
- 139 Zhou G T. Random amplitude and polynomial phase modeling of statistics processes using higher-order and cyclic statistics. Ph. D. dissertation, University of Virginia, 1995
- 140 Li Y. Blind channel identification and equalization using cyclostationary and/or higher order statistics. Ph. D. dissertation, Auburn University, 1995
- 141 Shamsunder S. Array and multichannel signal processing using higher order and cyclic statistics. Ph. D. dissertation, University of Virginia, 1994
- 142 Chen Y. J. Blind equalization using criterion with memory nonlinearity and cyclostationarity. Ph. D. dissertation, University of Southern California, 1993
- 143 Prakriya S. Blind identification of linear and nonlinear systems with cyclostationary inputs. M. S. dissertation, University of Toronto (Canada), 1993
- 144 Prakriya S. Blind identification of nonlinear systems based on higher order cyclic spectra. Ph. D. dissertation, University of Toronto (Canada), 1997
- 145 Smith L. Blind channel identification and equalization using second-order cyclostationarity. Ph. D. dissertation, The Pennsylvania State University, 1996