



国防科学技术大学

全国优秀博士学位论文丛书 [第二辑]

循环平稳信号处理 及其应用研究

黄知涛 著

国防科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

循环平稳信号处理及其应用研究/黄知涛著. —长沙:国防科技大学出版社, 2007. 7
(国防科学技术大学全国优秀博士学位论文丛书. 第2辑/曾淳主编)

ISBN 978 - 7 - 81099 - 416 - 3

I. 循… II. 黄… III. 信号处理—研究 IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 072310 号

国防科技大学出版社出版发行
电话:(0731)4572640 邮政编码:410073
<http://www.gfkdcbs.com>
责任编辑:耿 筠 责任校对:肖 滨
新华书店总店北京发行所经销
国防科技大学印刷厂印装

*

开本:787×1092 1/16 印张:19.5 字数:394 千
2007 年 7 月第 1 版第 1 次印刷
ISBN 978 - 7 - 81099 - 416 - 3
全套定价:150.00 元

国防科学技术大学

· 全国优秀博士学位论文丛书

第 2 辑

主 编 曾 淳

副主编 王维平 王雪松 彭再求

序 言

积淀孕育创新，智慧创造价值。

寒窗苦读，拼搏奋斗的积淀凝聚成一本本厚积薄发的论文。博士学位论文是博士生学术水平、科研能力、创造性成果的集中体现，也是学校研究生教育水平、学术水平和创新能力的重要标志。全国博士学位论文水平反映了我国高层次创新型人才培养的质量。作为国家 21 世纪教育振兴行动计划的重要内容，教育部每年评选 100 篇左右的全国优秀博士学位论文。该举措已成为提高研究生培养质量，鼓励创新，促进高层次创造性人才脱颖而出的重要措施。

自 1999 年教育部开展全国优秀博士学位论文评选以来，我校积极参加评选工作，同时参加湖南省和军队优秀博士、硕士学位论文的评选，并以此为契机，在我校研究生中大力倡导科学严谨的学风和勇攀高峰的精神，营造鼓励人才积极创新、支持人才实现创新的浓厚氛围，为学生的禀赋和潜能的充分开发创造一种宽松的环境；采取切实可行的措施，加强学科建设；通过深化研究生学位论文评阅制度改革，完善学位论文抽检制度，实施研究生创新工程，加强研究生导师队伍建设，建立激励机制，鼓励优秀人才脱颖而出等措施不断完善质量保证体系和监督机制，全面提高研究生培养质量。迄今为止，我校已有 7 篇学位论文获全国优秀博士学位论文，另有 7 篇博士学位论文被评为全国优秀博士学位论文提名论文。

睿智颖悟,优秀博士学位论文展现给我们的不仅仅是丰硕的科研成果,更是巨大的精神财富。全国优秀博士学位论文是我国优秀博士学位论文中的杰出代表,全国优秀博士学位论文作者是具有创造能力和竞争能力的高层次创造性人才,是支撑国家掘起的骨干创新力量。认真总结全国优秀博士学位论文的成功经验,对于进一步提高博士生教育的整体水平,培养数量更多、水平更高的高层次创造性人才,具有十分重要的启示作用。在2005年3月汇集出版的我校2004年及之前获得的全国优秀博士学位论文和全国优秀博士学位论文提名的10篇论文基础上,现将我校2005—2006年获得的4篇全国优秀博士学位论文和全国优秀博士学位论文提名论文汇集出版。旨在为广大在学博士生及其导师树立高水平博士学位论文的范本和学习榜样,也期望进一步推动我校研究生教育改革的深入发展,以培养高层次创新性人才为目标,认真总结创新性人才的培养经验和方法,深入探讨博士生教育改革的思路 and 措施。

当今世界,科学技术日新月异,科技创新已经成为社会生产力解放和发展的重要标志。科学技术的迅猛发展,正在引发一场广泛而深刻的军事变革,信息化战争时代已经来临。在新的历史条件下,面对世界新军事变革的严峻挑战,面对推进中国特色军事变革和军事斗争准备的紧迫需求,军队研究生教育的地位和作用比以往任何时候都更加突出。

国防科技大学承担着为国防安全建设和军队信息化建设、研究开发国防高科技和先进武器装备、培养军队高级工程技术和指挥人才的历史使命,是我军实现新军事变革和军队信息化建设的高层次人才培养和科学研究重要基地。提高人才培养的质量已成为我们现阶段亟需关注的问题之一。我们要在培养大批各类专业和指挥人才的同时,努力为优秀创新人才的脱颖而出

出创造条件。尤其要下功夫造就一批真正能站在世界科学技术前沿的学术带头人和尖子人才，以应对世界新军事变革的严峻挑战，为推进中国特色军事变革做出新的更大贡献。

国防科学技术大学研究生院

曾 淳

2007 年 4 月于长沙

2005—2006 年国防科技大学 全国优秀博士学位论文及 全国优秀博士学位论文提名论文

2005 年二篇全国优秀博士学位论文:

信息与通信工程学科,成礼智博士的论文《离散与小波变换新型算法及其在图像处理中应用的研究》,导师梁甸农教授;

原子与分子物理学科,陈平彬博士的论文《纠缠的提取和正交量子态的局域区分》,导师李承祖教授。

2005 年一篇全国优秀博士学位论文提名论文:

光学工程学科,侯静博士的论文《共光路/工模块自适应光学与位相畸变光束频过程研究》,导师姜文汉研究员。

2006 年一篇全国优秀博士学位论文提名论文:

信息与通信工程学科,黄知涛博士的论文《循环平稳信号处理及其应用研究》,导师周一宇教授。

分类号 TN911
U D C _____

学号 0049031
密级 _____

工学博士学位论文

循环平稳信号处理及其应用研究

博士生姓名：黄知涛

学科专业：信息与通信工程

研究方向：综合电子战系统与技术

指导教师：周一宇教授

国防科学技术大学研究生院

二〇〇三年九月

Researches on Cyclostationary Signal Processing and Its Applications

Candidate: Huang Zhitao
Supervisor: Prof. Zhou Yiyu

A Dissertation
Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Doctor of Engineering
in Information and Communication Engineering
Graduate School of National University of Defense Technology
Changsha, Hunan, P. R. China
September, 2003

常用符号

$(\cdot)^*$: 共轭

$(\cdot)^T$: 转置

$(\cdot)^H$: 共轭转置

α : 循环频率

Ω : 信号所有循环频率组成的集合

BPSK: 通信或雷达系统中的二相编码调制信号

QPSK: 通信或雷达系统中的四相编码调制信号

$M_x(t)$: 信号 $x(t)$ 的时变均值

$R_x(t, \tau)$: 信号 $x(t)$ 的时变自相关函数

$\langle f(t) \rangle$ 或 $\langle f(t) \rangle_t: \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$

$R_x^\alpha(\tau)$: 信号 $x(t)$ 在循环频率 α 处的循环自相关函数

$S_x^\alpha(f)$: 信号 $x(t)$ 在循环频率 α 处的循环谱自相关函数, 也称为循环谱

$X_T(t, f)$: 信号 $x(t)$ 在时间间隔 $[t - T/2, t + T/2]$ 的频谱

$S_{xT}^\alpha(t, f)_\Delta$: 信号 $x(t)$ 谱自相关函数在观测时间长度为 T 时的时间平滑估计

$\rho_{uv}(f)$: 信号 $u(t)$ 、 $v(t)$ 的归一化互谱密度函数

$\rho_x^\alpha(f)$: 信号 $x(t)$ 的谱自相干函数

$H_T(f)$: 循环相关匹配滤波器传递函数

$h_T(\tau)$: 循环相关匹配滤波器的冲击响应

d_{mT} : 循环相关匹配滤波器输出最大信噪比

$q(t)$: 矩形窗函数

$Q(f)$: 矩形窗函数的频谱

d_{MF} : 传统匹配滤波器输出最大信噪比

d_{OCMF} : 单循环频率循环相关匹配滤波器最大输出信噪比

d_{MOCMF} : 多循环频率循环相关匹配滤波器最大输出信噪比

R-SNR: 参考信号中信号噪声功率比

D : 真实时延 (或时差)

f_d : 多普勒频移

T_s : 采样间隔

F_s : 采样频率

σ^2 : 方差

T_c : 码片宽度

τ_0 : 循环相关匹配滤波器输出最大信噪比时刻

$A(\alpha)$, $A(\alpha, \theta_a)$: 循环频率 α 处的方向矩阵

$S_x^\alpha(f)$: 阵列各阵元输出信号循环谱组成的矢量

$S_s^\alpha(f)$: 空间源信号循环谱组成的矢量

$T(\alpha)$: 在循环频率 α 处的聚焦矩阵

U_{N+1} : 左特征向量

V_{N+1} : 右特征向量

$C_s^{\alpha-f}(u, f)$: 信号 $s(t)$ 的循环模糊函数

$J_s^{\alpha-f}(u, f)$: 信号 $s(t)$ 的谱循环模糊函数

$C_{xy}^{\alpha-f}(u, f)$: 信号 $x(t)$, $y(t)$ 的循环互模糊函数

$J_{xy}^{\alpha-f}(u, f)$: 信号 $x(t)$, $y(t)$ 的谱循环互模糊函数

CCMF: Cyclic Correlation Matched Filter: 循环相关匹配滤波器

SCCMF: single-cycle CCMF: 基于 CCMF 的单循环频率信号检测器

MCCMF: multi-cycle CCMF: 基于 CCMF 滤波器组的多循环频率信号检测器

AMCCMF: 只利用幅度信号的多循环频率信号检测器

SPS: single-cycle passive single-receiver: 单循环频率非合作单通道信号检测器

MPS: multi-cycle passive single-receiver: 多循环频率非合作单通道信号检测器

PSPB: partly-usable single-cycle passive bistatic: 单循环频率非合作双通道检测器

PMPB: partly-usable multi-cycle passive bistatic: 多循环频率非合作双通道检测器

S-CCMF: 基于单循环频率 CCMF 的信号时延估计方法

PS: 单循环频率信号时差估计方法

PM: 多循环频率信号时差估计方法

SC: 已有的单循环频率检测方法

MC: 已有的多循环频率检测方法

摘 要

从 20 世纪 80 年代中后期至今,循环平稳信号处理技术经过近二十年的发展,已在雷达、通信、声呐、导航等信号处理中得到了广泛应用,如对低截获概率信号(LPI)的截获处理、信号和系统分析、自适应波束形成、盲信号分离、盲通道均衡、线性/非线性系统辨识、调制识别、空间谱估计、无源定位、干扰抑制等。与传统功率谱分析方法相比,循环谱分析方法有三个重要的优势:

- (1) 循环谱分析方法具有可辨识能力。循环平稳信号的信号特征是离散分布在循环频率上的,即使该信号具有连续的功率谱。
- (2) 循环谱分析方法较传统的功率谱分析方法含有更丰富的信号信息。
- (3) 循环谱分析方法能更准确地对雷达、通信等系统中的绝大多数人工信号进行建模。

到目前为止,循环平稳信号处理技术研究的不足也是十分明显的,如缺少对循环平稳信号波形分析和设计的理论工具,多维循环平稳信号处理方法仍是空白,已有的基于信号循环平稳性的到达角估计方法还仅仅只局限于利用单个循环频率信号谱相关特征,对循环平稳信号具有线性时不变特征的滤波方法还不完善,等等。

论文的出发点是建立对循环平稳信号统一的一维(时域滤波)和二维(时频联合滤波)处理模型,研究一维、二维循环平稳信号处理方法及其在诸如信号检测、参数估计、信号波形分析和设计等领域中的应用;同时,对已有循环平稳信号空间谱估计方法进行进一步的完善,并结合循环平稳信号具有多个循环频率这一特点,研究利用多循环频率信号谱相关特征的处理方法。概括起来,论文的主要成果有以下几个方面:

1. 建立了对循环平稳信号的一维线性时不变滤波模型,提出了对循环平稳信号的循环相关匹配滤波理论,在此基础上构建了一种统一的循环平稳信号检测和参数估计方法。循环相关匹配滤波方法克服了传统统计处理方法因忽略信号循环平稳特性带来的性能下降,也克服了已有时变滤波方法和 FRESH 滤波方法难以实现的局限。在最大输出信噪比的约束下,由多个单循环频率循环相关匹配滤波器组成的循环相关匹配滤

波器组不需要事先对循环频率的选择进行考虑(这是单循环频率循环相关匹配滤波器必须要考虑的,因为滤波性能与循环频率的选择是直接相关的),并且具有更好的滤波性能。在此基础上构建了统一的循环平稳信号检测和参数估计方法。研究发现,已有的各种循环平稳信号检测和参数估计方法只是上述方法在特定条件下的实现形式。循环相关匹配滤波理论能很好地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。

2. 建立了对循环平稳信号的二维时频联合处理模型,首次提出了对循环平稳信号的时频二维联合估计方法。该研究解决了对接收信号多普勒频移失配的补偿问题,实现了对循环平稳信号的时频联合处理。上述联合估计方法首次将循环平稳信号处理技术从一维扩展到了二维,这为多维循环平稳信号处理技术的发展奠定了基础。

根据多循环频率循环相关匹配滤波器组的结构,在单循环频率时频联合估计的基础上推广得到了多循环频率时频联合估计方法。由于充分利用了信号的谱相关特征,多循环频率时频联合估计方法具有更加优良的性能。文章还对各种估计方法的参数估计性能进行了详细的理论分析,给出了参数估计精度的解析式。在基于广播、电视、移动通信等外辐射源信号的目标探测系统中,将上述二维联合处理方法用于对实测数据的处理,结果能很好地定位目标。算法在实验室环境和实际信号环境下均通过了验证,说明新方法确实是有效的。

3. 论文在二维时频联合处理模型的基础上,首次提出并构建了对循环平稳信号波形分析和设计的循环模糊函数理论。理论分析表明,传统的模糊函数已不能准确描述循环平稳信号的时频分辨特性,需要研究针对循环平稳信号波形分析与设计的理论工具。循环模糊函数可用于分析循环平稳信号的时间、频率分辨力,分别称为时间循环分辨力和频率循环分辨力。对典型循环平稳信号循环模糊函数的分析表明,循环模糊函数能更好地描述循环平稳信号的时频分辨性能。与模糊函数相类似,循环模糊函数还可用于循环平稳信号的波形设计。循环模糊函数理论进一步完善了模糊函数理论,其作用对象从确定性信号扩展到了一类特殊的非平稳信号或过程,即循环平稳信号或过程。

4. 论文首次提出了利用信号多循环频率循环平稳特征的到达角估计方法。现有的到达角估计方法都只研究利用特定循环频率处的信号循环平稳特征进行到达角估计。这些方法存在两个局限,一是到达角估计性能与所选择的循环频率直接相关,不同循环频率处到达角估计性能是不一样的;二是由于没有充分利用信号循环平稳特征,单

循环频率到达角估计方法性能不是最优的。新方法借鉴了传统宽带谱估计方法中聚焦变换的思想,并且利用 Jacobi-Anger 展开,将方向矩阵分解为两部分乘积的形式,一部分只与循环频率有关,另一部分只与到达角有关;通过这种变换,构造适当的聚焦矩阵,将多个特定循环频率处的数据矩阵聚焦到某个特定循环频率上,从而实现了对多循环频率的“聚焦处理”。新方法克服了单循环频率到达角估计方法的不足,将循环平稳信号处理技术在空间谱估计领域的应用向前推进了一步,丰富了多循环频率循环平稳信号处理技术。

5. 现有的循环平稳信号到达角估计方法只利用了信号二阶或更高阶循环平稳特征。考虑到在雷达、通信等系统中也存在大量一阶循环平稳信号,论文研究了基于一阶循环平稳特性的到达角估计方法。在双阵元测向时,该方法不仅计算量小,便于实时工程实现,估计性能和干涉仪近似,并且能实现对多个信号的同时测向,这是传统干涉仪所不具备的。上述方法在双阵元测向上具有极大的应用前景,可望取代传统的干涉仪测向方法。

6. 提出了两种改进的循环平稳信号到达角估计方法,分别是基于循环互相关和基于加权循环谱的到达角估计方法。第一种方法充分利用了互相关运算较自相关运算更好的噪声抑制能力,使得新算法具有更好的低信噪比特性。第二种方法首次在循环频域实现了对到达角的估计,并且克服了现有 SC-SSF 估计方法无法在时域定量确定最大延迟时间的不足,与 SC-SSF 算法相比,新算法不仅没有降低性能,还在一定程度上减少了计算量,更利于工程实现。

7. 论文定量分析了单循环频率 SC-SSF 估计方法的估计性能,包括有限取样数对矩阵特征分解精度的影响、单循环频率到达角估计方法的克拉美-罗限和估计方差,以及多循环频率到达角估计方法的克拉美-罗限。

关键词:循环平稳信号;匹配滤波;时频估计;循环模糊函数;多循环频率;空间谱估计;性能分析

ABSTRACT

From the middle of 1980s, cyclostationary signal processing techniques have been widely used in the signal processing systems of radar, communication, sonar and navigation etc., such as interception of LPI (Low Probability of Interception) signals, analysis of some signals and systems, adaptive beamforming, blind source separation, blind channel equalization, blind identification of linear and nonlinear systems, modulation recognition, spatial spectrum estimation, passive location and interferences suppression, etc. There are three important advantages of cyclic spectral analysis over power spectrum.

(1) The first advantage of cyclic spectral analysis is its discriminatory capability. Signals features are discretely distributed in cycle frequency in the cyclic spectrum, even if the signal has continuous distribution in the power spectrum.

(2) The second advantage of cyclic spectral analysis is that the cyclic spectrum is a much richer domain for signal analysis than the conventional power spectrum.

(3) The third advantage of cyclic spectral analysis lies in the theory underlying the techniques. The cyclic spectrum provides a much more complete mechanism for modeling manmade signals in radar, communication systems than power spectrum.

So far, there still exist many problems upon the cyclostationary signal processing techniques. For example, there is the lack of the mathematic tool for the wave analysis and designing for cyclostationary signals or processes, researches on multi-dimensional cyclostationary signal processing methods are still blank, the existing DOA (Direction-of-Arrival) estimation algorithms for cyclostationary signals suffer from exploiting spectral correlation features utilizing only one cycle frequency, and the problem of designing optimal linear time-invariant filter for cyclostationary signals still needs to be studied, etc.

The purposes of the dissertation are as follows. The first is to introduce the generalized one- and two-dimensional cyclostationary processing models and develop algorithms for cyclostationary signals in the applications such as signal detection, parameter estimation, wave analysis and designing, etc. The second is to put forward some new DOA estimation algorithms with better performance than the existing methods. The last is to derive the multi-cycle cyclostationary signal

processing methods by exploiting cyclostationarity properties utilizing multiple cycle frequencies for the estimation of TDOA, Doppler shift and DOA, etc. In conclusion, the main innovations of the dissertation are as follows:

1. The one-dimensional linear time-invariant filtering model for cyclostationary signals is introduced, and the so-called Cyclic Correlation Matched Filtering (CCMF) is proposed, based on which a generalized model for the detection and estimation for cyclostationary signals is developed. CCMF performs better than conventional statistical signal processing methods which ignores the cyclostationarity property by introducing time-averaging operation, and can be more easily put into practice than periodic time-variant filtering algorithms and the FRESH method. Since the performance of single-cycle CCMF is somehow subject to the selected cycle frequency, multiple single-cycle CCMFs can be fused together to form one filter referred to as multi-cycle CCMF by maximizing the output signal-to-noise ratio (SNR), which is independent of the particular cycle frequency and outperform the CCMF. Researches indicate that most of the existing detection and estimation methods for cyclostationary signals can be deduced by CCMF theory.

2. The two-dimensional time and frequency filtering model is introduced, and the approach to the joint estimation of TDOA and Doppler shift is present for cyclostationary signals, which can accommodate the Doppler shift in the received signals. The new approach extends the one-dimensional cyclostationary signal processing techniques to the two-dimensional ones, which supplies the possibility of the development of the multi-dimensional cyclostationary signal processing techniques.

According to the structure of the multi-cycle CCMF, the multi-cycle joint TDOA and Doppler shift estimation algorithm can be developed, which performs significantly better than the single-cycle CCMF. Performances analyses for different estimation algorithms in different signal environments are performed and the estimation variances are derived. By utilizing FM radio, TV, mobile signals emitting from a remote transmitter as the source signal to passively locate airborne targets, the newly given algorithm is employed in the practical experiments to detect the airplane. The experiment results demonstrate the effectiveness of the given approach.

3. Based on the two-dimensional time and frequency filtering model, cyclic ambiguity function is introduced for the first time for the wave analysis and designing for cyclostationary signals. Theoretical researches have shown that the conventional ambiguity function cannot describe exactly the time and frequency characteristic of the cyclostationary signals. The time and frequency resolution ability determined by the cyclic ambiguity function is referred to as the cyclic time resolution and cyclic frequency resolution respectively. By calculating the cyclic ambiguity

function of typical cyclostationary signals, results demonstrate the better resolution of the cyclic correlation method than the conventional ambiguity function. Just like conventional ambiguity function, Cyclic ambiguity function can also be used as the mathematic tool for optimal wave designing for cyclostationary signals. The cyclic ambiguity function theory perfects the ambiguity function by extending the signal model from determinate signals to a type of particular nonstationary signals or processes, namely cyclostationary signals or processed.

4. A novel DOA estimation approach referred to as the multi-cycle DOA algorithm is developed by exploiting the cyclostationarity property at multiple cycle frequencies for the first time. Since all the existing DOA algorithms exploit the cyclostationarity property at particular single cycle frequencies, they have two shortcomings: (1) The DOA estimation performance is subject to the selected cycle frequency; (2) the single-cycle DOA estimation algorithm can not reach the best performance because the cyclostationary features at other cycle frequencies are lost. The new algorithm uses the focusing transform in the conventional wideband spatial spectrum estimation for reference, and employs the Jacobi-anger expansion to divide the data covariance matrix into two parts with one part determined by cycle frequencies and other part determined by the direction of arrival. Based on this transform, the focusing matrix can be developed, which can focus all the data covariance matrix at multiple cycle frequencies to one data covariance matrix at some particular cycle frequency. The new algorithm overcomes the shortcomings shared by the single-cycle DOA estimation method, which perfects the applications of the cyclostationary signal processing techniques in spatial spectrum estimation.

5. As far as we know, almost all of the existing DOA estimation methods exploit the 2nd-order or higher-order cyclostationarity property. Since there exist many 1st-order cyclostationary signals encountered in radar and communication systems, a new DOA estimation method exploiting 1st-order cyclostationarity property is developed. In applications with antenna array consisting of only two sensors, the new algorithm performs as well as an interferometer with less computational burden. By exploiting the cyclostationarity property, the new signal-selective algorithm can simultaneously obtain multiple directions for different signals, which can be hardly realized by the interferometer. This promising new two-sensor DOA estimation algorithm can be supposed to replace the conventional interferometer in most cases.

6. Two modified DOA estimation algorithms are proposed. One is referred to as the cyclic cross-correlation based algorithm and the other is referred to as the weighted cyclic spectrum based algorithm. The former algorithm has the better capability of noise suppression than the cyclic autocorrelation algorithm, and can work more efficiently in low SNR environments. The