



国防科技图书出版基金

B

blind Source Separation Principles and
Algorithms Based on Cyclostationary Theory

循环平稳理论的 盲源分离原理与算法

李灯熬 赵菊敏 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

循环平稳理论的 盲源分离原理与算法

Blind Source Separation Principles and
Algorithms Based on Cyclostationary Theory

李灯熬 赵菊敏 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

循环平稳理论的盲源分离原理与算法/李灯熬,
赵菊敏著. —北京:国防工业出版社, 2015. 1

ISBN 978-7-118-09821-1

I. ①循... II. ①李... ②赵... III. ①信号盲
分离 IV. ①TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 232731 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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 12 字数 220 千字

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

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
第七届评审委员会组成人员**

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

盲源分离是 20 世纪 90 年代末期出现的一种新的信号处理方法,它在源信号及传输信道未知的情况下,仅利用接收滤波器输出的观测数据恢复源信号,主要用于恢复和提取多通道混合信号中的潜在成分,进而在混合信号中分离出有用信号。盲源分离由于不需要训练序列就能实现对混合源信号的分离,目前已广泛应用于通信、图像处理、国防军事、生物医学、地质勘探等领域,使得其越来越成为信号处理中一个极具潜力的分析工具,已成为信号处理领域的重要热点研究课题之一。循环平稳理论的盲源分离算法研究紧跟国内外最新研究动态,是信号处理领域的重要的分支学科。

自 2007 年开始,在山西省青年科学基金项目“基于循环平稳理论盲均衡技术的研究”(2007021016)和“基于二阶循环统计量盲均衡器的研究”(2010021017)、山西省国际科技合作项目“基于 BSS 心脏模型虚拟现实的心脏病灶诊断”(2012081031)、山西省留学回国人员科研资助项目“稀疏条件下的欠定二导联房颤信号的提取及其虚拟实现”(2013-032)和国家自然科学基金青年科学基金项目“心电信号 J 波提取理论与关键技术研究”(61303207)等课题的资助下,本书作者及其所指导的硕士研究生张海燕、马庆伦、郭璘婕、陈琛、郝德峰、刘红燕、白雁飞、刘学博、刘婷等,将信号的循环平稳特性与盲源分离算法有效结合,系统地研究了基于循环平稳理论的盲源分离算法,一些研究成果已在国内外重要学术期刊及学术会议上发表。本书作为这些研究成果的总结与提炼,反映了目前国内外盲源分离方面的研究动态,集中介绍了循环平稳理论盲源分离的核心算法以及应用实例。

本书共分为 6 章。第 1 章绪论,主要介绍了循环平稳理论盲源分离算法的研究意义和研究背景,分析了盲源分离算法在信号分离领域中的应用,并就国

内外学者对盲源分离、循环平稳理论以及基于循环平稳理论盲源分离算法的研究动态进行了阐述,指出了本书的结构安排。第2章基于循环平稳理论的盲源分离,主要介绍了盲源分离的模型、独立性判据、盲源分离的各种算法以及算法的性能评判,提出将循环平稳统计量用于控制分离矩阵,通过循环平稳分离矩阵抑制非平稳噪声,从而实现混合信号的有效分离方法。第3章基于循环平稳度的盲源分离算法,主要介绍了循环平稳度及其特性,提出利用循环平稳度控制盲源分离矩阵,实现基于二阶循环平稳度的盲源分离算法,并详细推导了二阶循环平稳度准则,从而提出基于该准则的盲源分离算法。同时,把循环平稳度的概念扩展到高阶循环平稳信号的应用中,推导了三阶循环累积量的循环平稳度准则,并证明其有效性,提出了基于三阶循环平稳度准则的盲源分离算法。仿真结果表明,其以循环平稳度为准则的盲源分离算法,能够很好地抑制混合信号中的高斯噪声和对称噪声,针对信道噪声有较强的鲁棒性,对于源信号具有较好的盲源分离效果。第4章基于对角化原理的循环平稳盲源分离算法,分析了联合矩阵近似对角化的过程,提出了基于鲁棒白化平均矩阵对角化盲源分离算法,对混合循环平稳信号进行鲁棒白化处理,将其循环协方差矩阵记为一个矩阵集,求该矩阵集的平均,通过联合近似对角化实现循环平稳信号的盲分离。该算法通过矩阵统计特性,降低了计算复杂度。同时,提出了基于循环平稳理论的JADE盲源分离算法。对接收信号做白化处理,再实现混合信号的去相关,将不同循环频率的信号进行分组,对每组信号运用JADE法分别进行分离,从而实现混合信号的盲源分离的目的。仿真表明,该算法具有较好的分离效果。第5章基于互信息量最小化的循环平稳信号盲源分离算法,阐述并分析了KL散度和最小互信息量及其性质,根据互信息量最小准则,提出了互信息量最小化的循环平稳信号盲源分离算法。仿真结果表明,信噪比越大,均方误差越小,说明该算法性能较好。第6章基于循环平稳理论的变步长盲源分离算法,在基于最小互信息量的循环平稳盲源分离(MMI—CS—BBS)算法的基础上,为了克服收敛速度与稳健性之间的矛盾,提出了一种变步长的循环平稳信号盲源分离(VSS—CS—BBS)算法,该算法采用自适应变步长代替了原算法中的步长,合理选取算法中各个参数。仿真结果表明,本算法既有很快的收敛速度,又有很好的稳健性。继而又介绍了三种变步长算法,分别是分阶段变步长循环平稳信

号盲源分离算法、基于类似性能指数曲线的变步长循环平稳信号盲源分离算法和基于分离度的变步长盲分离算法。附录提供本书的英汉对照术语表。书中一些内容取材于最近的国内外文献资料,各章后面都附有较多的参考文献,以便读者进一步查阅。

本书具有以下几个鲜明特点:

(1) 新颖性:反映了当今盲源分离算法解决盲信号处理的最新研究进展,论述的各种理论是目前研究与应用的热点或将要引起人们关注的理论问题,内容新颖、丰富,可启发相关领域的研究人员开展自己的新研究方向。

(2) 学术性:具有一定的理论高度和学术价值,书中大部分内容取材于国际、国内一流学术期刊发表的论文和作者的科研成果,细致而全面地展示国内外大量最新的科学研究内容和发展动向,具有一定的前瞻性和学术参考价值。

(3) 应用性:内容面向应用,尽量避免特别繁杂的数学理论推导,强调在实际工程中的应用,为在各学科领域中扩展应用和延伸提供新型的优化方法。

本书在编写过程中,得到了天津大学博士研究生导师张立毅教授、太原理工大学博士研究生导师王华奎教授和张刚教授等的大力支持和帮助,天津商业大学陈雷博士也给予了帮助,同时还参阅和引用了部分国内外学者的相关文献,在此一并致以诚挚的谢意。

由于作者水平有限,书中难免会出现一些疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

谨以我的辛勤耕耘,奉献给我挚爱的人们!

李灯熬 赵菊敏

2014年8月

E-mail: lidengaoty@126.com

目 录

第1章 绪论	1
1.1 盲源分离的研究意义	1
1.2 盲源分离的国内外研究现状	4
1.2.1 循环平稳理论的研究现状	4
1.2.2 盲源分离算法的发展现状	8
1.2.3 基于循环平稳理论的盲源分离	14
1.3 盲源分离的应用领域	15
1.3.1 语音信号处理和图像信号处理领域	16
1.3.2 生物医学信号处理领域	16
1.3.3 通信信号处理领域	16
1.3.4 工业过程监测领域	17
1.3.5 金融分析领域	18
1.3.6 国防军事领域	18
1.4 本书的研究背景	20
1.5 本书的结构与章节安排	20
参考文献	22
第2章 基于循环平稳理论的盲源分离	31
2.1 线性混合盲源分离模型	31
2.1.1 数学模型	31
2.1.2 假设条件与不确定性	34
2.1.3 盲源分离前期预处理	36
2.2 盲源分离的独立性判据及常用算法	37
2.2.1 独立判据	38

2.2.2 盲源分离算法	42
2.3 盲源分离算法的性能评判	51
2.3.1 主观定性评判方法	51
2.3.2 客观定量评判方法	52
2.4 循环平稳理论	53
2.4.1 低阶循环平稳过程	56
2.4.2 高阶循环统计量	60
2.5 循环平稳理论的盲源分离	65
2.6 本章小结	67
参考文献	67
第3章 基于循环平稳度的盲源分离算法	70
3.1 二阶循环平稳度分离准则	70
3.1.1 二阶循环统计量	70
3.1.2 二阶循环平稳度准则	71
3.2 基于二阶循环统计量的 DCS 盲源分离算法	72
3.2.1 基于循环平稳理论的盲源分离原理	72
3.2.2 算法性能分析	75
3.2.3 实验仿真	76
3.3 高阶累积量循环平稳度准则	78
3.3.1 高阶循环累积量	78
3.3.2 高阶循环平稳度分离准则	83
3.4 基于高阶循环平稳度准则的盲源分离算法	87
3.4.1 算法原理	87
3.4.2 计算机仿真	88
3.4.3 算法性能分析	90
3.5 本章小结	91
参考文献	92
第4章 基于对角化原理的循环平稳盲源分离算法	93
4.1 矩阵对角化及特征值分解	93
4.1.1 矩阵可对角化理论	93

4.1.2	矩阵的奇异值分解	98
4.1.3	信号的白化处理	99
4.2	二阶循环平稳理论的鲁棒白化平均矩阵对角化盲源分离算法	102
4.2.1	鲁棒预白化	102
4.2.2	基于鲁棒白化平均矩阵对角化盲源分离算法	103
4.2.3	算法的基本理论	104
4.2.4	算法性能指标	106
4.2.5	计算机仿真	106
4.3	联合近似对角化原理	109
4.3.1	循环累积量矩阵	109
4.3.2	联合近似对角化原理	110
4.4	基于四阶循环累积量的 JADE 盲源分离算法	112
4.4.1	JADE 盲源分离算法原理	112
4.4.2	基于四阶循环累积量的 JADE 盲源分离算法	114
4.4.3	实验仿真	115
4.5	本章小结	118
	参考文献	119
第 5 章	基于互信息量最小化的循环平稳信号盲源分离算法	120
5.1	信息论的基本概念	120
5.1.1	KL 散度	120
5.1.2	互信息量	121
5.2	基于互信息量的盲源分离算法	121
5.2.1	目标函数	121
5.2.2	寻优算法	123
5.3	基于最小互信息量的循环平稳盲源分离算法	127
5.3.1	信息量最小化准则	127
5.3.2	基于最小互信息量的循环平稳盲源分离算法	128
5.3.3	计算机仿真	131
5.3.4	算法性能分析	133
5.4	本章小结	135

参考文献	135
第 6 章 基于循环平稳理论的变步长盲源分离算法	137
6.1 变步长盲源分离算法	137
6.2 峭度自适应变步长循环平稳信号盲源分离算法	141
6.2.1 算法的推导过程	141
6.2.2 实验仿真	143
6.2.3 算法性能分析	144
6.3 分阶段变步长循环平稳信号盲源分离算法	146
6.3.1 算法的推导过程	146
6.3.2 实验仿真	150
6.3.3 算法性能分析	151
6.4 基于类似性能指数曲线的循环平稳信号的变步长盲源分离算法	154
6.4.1 算法原理	154
6.4.2 实验仿真	156
6.4.3 算法性能分析	158
6.5 基于分离度的变步长循环平稳信号盲源分离算法	160
6.5.1 算法原理	160
6.5.2 实验仿真	161
6.5.3 算法性能分析	165
6.6 本章小结	165
参考文献	166
附录 英汉对照术语表	168

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 The Researching Significance of BSS	1
1.2 Domestic and Foreign Research Status of BSS	4
1.2.1 The Research Status of Cyclostationary Theory	4
1.2.2 Development Status of BSS	8
1.2.3 The BSS based on Cyclostationary Theory	14
1.3 Application Fields of BSS	15
1.3.1 The Field of Speech Signal Processing and Image Signal Processing	16
1.3.2 The Field of Biomedical Signal Processing	16
1.3.3 The Field of Communication Signal Processing	16
1.3.4 The Field of Industrial Process Monitoring	17
1.3.5 The Field of Financial Analysis	18
1.3.6 The Field of Defense and Military	18
1.4 The Research Background of the Book	20
1.5 The Structure and Chapter Arrangements of the Book	20
References	22
Chapter 2 The BSS Based on Cyclostationary Theory	31
2.1 Linear Mixed Model of BSS	31
2.1.1 Mathematical Model	31
2.1.2 Assumptions and Uncertainties	34
2.1.3 BSS Preliminary Pretreatment	36
2.2 Independence Criterion and Common Algorithms of BSS	37

2.2.1	Independence Criterion	38
2.2.2	The BSS Algorithms	42
2.3	The Performance Index of BSS Algorithms	51
2.3.1	The Subjective Qualitative Evaluation Method	51
2.3.2	The Objective and Quantitative Evaluation Method	52
2.4	The Cyclostationary Theory	53
2.4.1	The Low-level Circulation Stationary Process	56
2.4.2	Higher-order Cyclic Statistics	60
2.5	The Cyclostationary Theory of BSS	65
2.6	The Summary	67
	References	67
Chapter 3	The BSS Algorithm Based on Cyclostationary Degree	70
3.1	The Separation Criteria Second Order Degree of Cyclostationary	70
3.1.1	Second-order Cyclic Statistics	70
3.1.2	The Criteria of Second-order Degree of Cyclostationary	71
3.2	The BSS Algorithm Based on Second-order Cyclic Statistics of DCS	72
3.2.1	The BSS Principle Based on Cyclostationary Theory	72
3.2.2	The Performance Analysis of Algorithms	75
3.2.3	Experimental Simulation	76
3.3	Cyclostationary Degree of Higher-order Cyclic Cumulants	78
3.3.1	Higher-order Cyclic Cumulant	78
3.3.2	Higher-order Cyclostationary Degree Separation Criteria	83
3.4	The BSS Algorithm Based on Higher-order Cyclostationary Degree Criteria	87
3.4.1	The Principle of Algorithm	87
3.4.2	The Computational Simulation	88
3.4.3	The Principle Analysis to Algorithm	90
3.5	The Summary	91

References	92
Chapter 4 The Cyclostationary BSS Algorithm Based on the Principle of Diagonalization	93
4.1 Matrix Diagonalization and Eigendecomposition	93
4.1.1 The Theory of Diagonalizable Matrix	93
4.1.2 Singular Value Decomposition of Matrix	98
4.1.3 Whitening Process of Signal	99
4.2 The BSS Algorithm Based on Robust Whitening Average Matrix Diagonalization of Second-order Cyclostationary Theory	102
4.2.1 Robust Pre-whiten	102
4.2.2 The BSS Algorithm Based on Robust Whitening Average Matrix Diagonalization	103
4.2.3 The Basic Theory of Algorithm	104
4.2.4 The Performance Index of Algorithm	106
4.2.5 The Computational Simulation	106
4.3 The Principle of Joint Approximate Diagonalization	109
4.3.1 The Cyclic Cumulation Matrix	109
4.3.2 The Principle of Joint Approximate Diagonalization	110
4.4 The BSS Algorithm of JADE Based on Fourth-order Cyclic Cumulant	112
4.4.1 The BSS Algorithm of JADE	112
4.4.2 The BSS Algorithm of JADE Based on Fourth-order Cyclic Cumulant	114
4.4.3 Experimental Simulation	115
4.5 The Summary	118
References	119
Chapter 5 The Cyclostationary BSS Algorithm of Minimum Mutual Information	120
5.1 The Basic Concept of Information Theory	120
5.1.1 The KL Divergence	120

5.1.2	Mutual Information	121
5.2	The BSS Algorithm Based on Mutual Information	121
5.2.1	The Objective Function	121
5.2.2	The Optimize Algorithm	123
5.3	The Cyclostationary BSS Algorithm Based on Minimum Mutual Information	127
5.3.1	Minimum Information Criterion	127
5.3.2	The Cyclostationary BSS Algorithm Based on Minimum Mutual Information	128
5.3.3	The Computational Simulation	131
5.3.4	The Performance Analysis of Algorithm	133
5.4	The Summary	135
	References	135
Chapter 6	The Cyclostationary BSS Algorithm of Variable Step-size ...	137
6.1	The BSS Algorithm of Variable Step-size	137
6.2	The Cyclostationary BSS Algorithm of Kurtosis Adaptive Variable Step-size	141
6.2.1	Derivation Process of Algorithm	141
6.2.2	Experimental Simulation	143
6.2.3	The Principle Analysis to Algorithm	144
6.3	The BSS Algorithm of Cyclostationary Signals Based on Phased Variable Step-size	146
6.3.1	The Derivation Process of Algorithm	146
6.3.2	Experimental Simulation	150
6.3.3	The Principle Analysis to Algorithm	151
6.4	The BSS Algorithm of Cyclostationary Signals Based on Analogizing PI	154
6.4.1	The Principle of Algorithm	154
6.4.2	Experimental Simulation	156