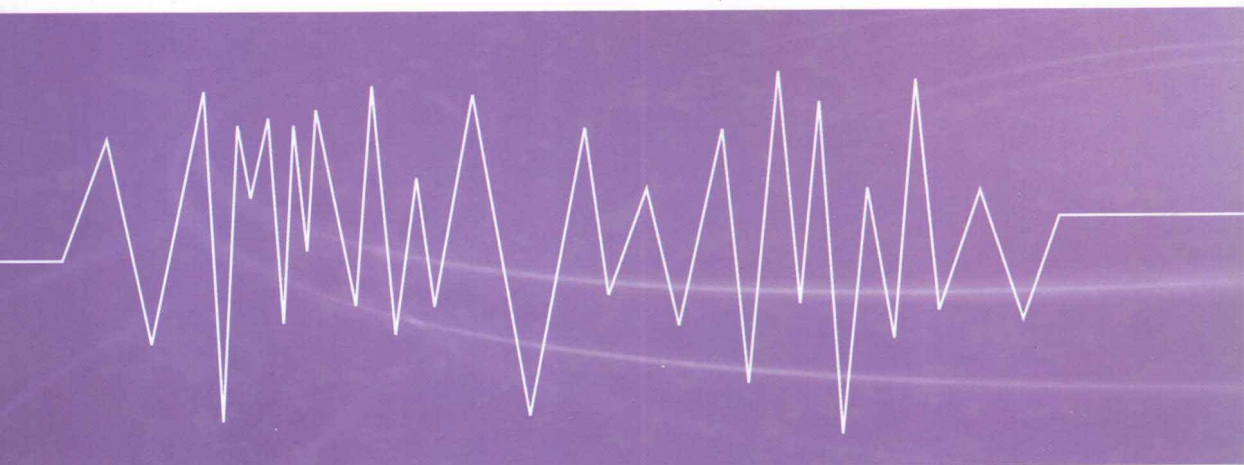


孙守宇 编著

盲信号处理基础 及其应用



Blind Signal Processing Foundation
and It's Applications



国防工业出版社
National Defense Industry Press

图书在版编目(CIP)数据

盲信号处理基础及其应用 / 孙守宇编著. —北京:
国防工业出版社, 2010. 7

ISBN 978 - 7 - 118 - 06819 - 1

I. ①盲... II. ①孙... III. ①信号处理 IV.
①TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 118974 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 11 字数 202 千字

2010 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 39.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

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 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参
(按姓氏笔画排序)

李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 王小谟

前 言

现代自适应信号处理根据学习方式可以划分为监督学习和非监督学习两大类,通常把非监督学习方式的自适应信号处理称作盲信号处理(BSP)。盲信号处理是目前信号处理领域最热门的新兴学科之一。盲信号处理原则上不利用任何训练数据,也没有关于混合、滤波、卷积系统参数的先验知识。即传感器记录的失真带噪数据是盲信号处理唯一可利用的信息,因此,基于盲信号处理的应用研究课题非常广泛,主要领域有生物医学信号处理、地震探测信号处理、遥感图像信号处理、数字通信信号处理、语音识别信号处理等。不同领域的研究者对盲信号处理的不同方面感兴趣。生物和神经科学家对非监督自学习的生物神经网络模型的发展感兴趣;数学和物理学家的兴趣在于研究各种盲信号处理算法的机理、特征和功能,以便推广到更复杂的模型中去;工程技术研究者感兴趣的是如何应用盲信号处理的简单算法解决实际工程问题,他们无疑是盲信号处理研究的最大群体。

实际上,盲信号处理具有可靠的理论基础和许多方面的应用潜力,是国防现代化和武器装备现代化所需要的高新技术,对于战场侦察信号的处理具有参考应用价值。盲信号处理的军事应用前景广阔,因为战场侦察信号都是失真带噪的信号,不可能利用训练数据,所以推动盲信号处理在军事武器装备上的应用研究意义重大。

本书第1章绪论概述盲信号处理的研究方向和研究方法、最新进展及其潜在应用。盲信号处理主要包括盲信源分离和盲信道均衡两个研究方向。盲信号处理主要有三个研究方法:Busgang 统计算法、高阶统计量方法和信息理论方法。第2章是研究盲信号处理的理论基础,内容涉及信息和熵、高阶统计量、自组织神经网络、标准梯度、自然梯度自适应以及主元分析等。第3章研究盲信源分离,介绍了该技术的许多有效算法,详细论述了收敛速度快、稳态误差小的峭度自适应学习率的盲信源分离算法。还介绍了信源信号的盲抽取技术。第4章研究盲信道均衡,主要涉及同态均衡、倒谱均衡和恒模算法(CMA)等内容,特别详细论述了收敛速度快的修正恒模算法及其在分数间隔盲均衡中的应用。第5章论述盲信号处理两大主要内容(盲信源分离和盲信道均衡)之间的关系。

本书与国内外出版的同类书比较的主要特点是:

(1) 系统地介绍了盲信号处理的基本原理,国内出版的一些书中只是把盲信号处理作为个别章节加以介绍,本书可以作为信号处理专业选修课教材使用;国外出版的同类书,起点过高,论述生涩,不便于初学者入门,本书将盲信号处理基本原理和实际应用相结合,有助于提高读者的兴趣,是进入该领域研究的理想参考书。

(2) 内容结构合理,论述循序渐进,特别是盲信源分离和盲信道均衡的一些应用实例有利于启发读者联系实际,解决具体问题。

本书主要内容是作者在清华大学博士期间的理论研究成果,部分内容是作者在国防科技大学博士后流动站期间所作的有关盲信号处理和应用的专题报告,有些内容来源于作者发表的学术论文和获得的专利,其他内容是作者消化科学文献,并按盲信号处理的理论体系整理的成果。

盲信号处理应用实例主要包括:自然梯度在噪声中正弦信号的估计问题和系统辨识中单层感知机参数估计问题(见第2章);主元分析(PCA)在图像压缩编码中的应用(见第2章);盲信源分离在欠高斯信号(通信信号)、超高斯信号(语音信号)以及图像信号分离中的应用(见第3章);盲信道均衡重点仿真验证了恒模算法在频率选择性信道中码元间隔和分数间隔的效果(见第4章);最后,基于多用户峭度最优化准则进行了盲分离和盲均衡的综合应用(见第5章)。上述应用提供了详细的算法和仿真实验参数,对盲信号处理感兴趣的读者只需将算法和参数稍加修改即可用于自己的研究之中。

在清华大学电子工程系博士学习期间,感谢导师郑君里教授将作者带入盲信号处理这一新的研究领域;在新世纪初清华大学研究生的课堂上,杨行峻教授讲授“人工神经网络”和朱雪龙教授讲授“信息论”课程时,均补充介绍了盲信号处理相关内容,作者在听课中得到两位先生有益的启发和激励;就盲信号处理的个别专题,作者与清华大学电子工程系副教授谷源涛博士进行了多次有益的讨论。在国防科技大学博士后流动站期间,作者与合作导师庄钊文教授、魏急波教授就盲信号处理的专题应用进行了深入的交流,并得到军队科研项目的资助研究;作者与流动站的老师和研究生就盲信号处理的原理和应用进行了广泛的讨论和交流。在此向上述老师们表示感谢。

由于盲信号处理发展极其迅速,各种算法和应用的最新成果很多,本书只能立足于盲信号处理的基本原理和应用,进行内容选取、组织和分析。由于作者水平有限,错误、遗漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 盲信号处理	1
1.1.1 映射和逆映射	1
1.1.2 卷积和解卷积	2
1.1.3 盲信号处理的基本问题	2
1.2 盲信源分离	3
1.2.1 盲信源分离的数学描述	3
1.2.2 盲信源分离研究之进展	4
1.3 盲信道均衡	5
1.3.1 盲信道均衡的数学描述	5
1.3.2 盲信道均衡研究之进展	6
1.4 自适应滤波	7
1.4.1 传统自适应滤波器	7
1.4.2 监督和无监督自适应滤波器	7
1.5 无监督自适应滤波的三种基本方法	8
1.5.1 Bussgang 统计算法	8
1.5.2 高阶统计量方法	9
1.5.3 信息理论方法	9
1.6 本书各章内容概要	10
第2章 盲信号处理的理论基础	12
2.1 熵和信息	12
2.1.1 熵	12
2.1.2 K-L 熵和互信息	13
2.1.3 负熵	15
2.1.4 可逆的概率密度变换	16
2.2 高阶统计量	17
2.3 自组织神经网络	19
2.3.1 线性自组织	20

2.3.2	非线性自组织	21
2.4	递归网络	21
2.5	标准梯度自适应	23
2.5.1	参数和代价函数	23
2.5.2	最陡下降法	24
2.5.3	统计梯度下降法	25
2.5.4	最陡下降法的行为	26
2.6	自然梯度自适应	28
2.6.1	欧氏几何和黎曼几何	28
2.6.2	自然梯度下降法	31
2.6.3	自然梯度与其他算法的关系	33
2.7	自然梯度模拟实例	34
2.7.1	噪声正弦函数的最大似然估计	34
2.7.2	单层感知机训练	36
2.8	主元分析法	39
2.8.1	特征值分解	40
2.8.2	第一主元估计学习算法	43
2.8.3	几个主元自适应提取算法	45
第3章	盲信源分离	50
3.1	直观理解盲信源分离	50
3.2	独立元分析概述	52
3.2.1	独立元分析基础	52
3.2.2	与ICA有关的模糊性	53
3.3	利用神经网络的独立元分析	53
3.3.1	预白化过程	54
3.3.2	分离过程	55
3.3.3	ICA基矢量的估计	56
3.4	ICA的对比函数	58
3.4.1	无噪线性混合的ICA	58
3.4.2	基于似然性的对比函数	58
3.4.3	基于互信息的对比函数	59
3.4.4	基于信息最大化的对比函数	59
3.4.5	基于统计量的对比函数	60
3.5	ICA估计的非高斯性	62

3.5.1	非高斯即独立	62
3.5.2	非高斯性的峭度度量法	63
3.5.3	非高斯性的负熵度量法	65
3.6	盲信源分离的有效算法	67
3.6.1	最大熵方法	67
3.6.2	最小互信息方法	69
3.6.3	自然梯度学习算法的等价变化性	70
3.6.4	通信信号盲分离仿真	71
3.6.5	语音信号盲分离仿真	75
3.6.6	ICA 的快速定点算法	78
3.6.7	图像信号盲分离仿真	80
3.7	峭度自适应学习率的盲信源分离算法	83
3.7.1	盲信源分离算法学习率讨论	83
3.7.2	峭度自适应学习率的盲信源分离算法	84
3.7.3	计算机仿真	86
3.8	信源信号的盲抽取	87
3.8.1	单个源信号抽取方法	88
3.8.2	一组信源的盲抽取	92
第4章	盲信道均衡	95
4.1	信道均衡的概念	96
4.1.1	信道模型	96
4.1.2	最小和最大相位信道	98
4.1.3	均衡器结构	98
4.1.4	基于训练的自适应均衡	99
4.1.5	盲自适应均衡	100
4.2	同态滤波盲均衡	101
4.3	数字通信信道的盲均衡	103
4.3.1	LMS 盲均衡	105
4.3.2	二进制数字信号的均衡	107
4.4	基于高阶统计量的均衡	108
4.4.1	基于高阶倒谱的盲均衡	108
4.4.2	二倒谱	110
4.4.3	三倒谱	111
4.5	基于码元间隔的恒模算法	113

4.5.1	信道均衡的条件	113
4.5.2	恒模算法	113
4.5.3	修正恒模算法	114
4.5.4	仿真实验和性能比较	114
4.5.5	MCMA 频率选择性信道盲均衡性能分析	118
4.6	基于分数间隔的恒模算法	121
4.6.1	分数间隔采样对盲均衡的意义	121
4.6.2	单输入多输出模型	122
4.6.3	分数间隔的修正恒模算法	124
4.6.4	计算机仿真实验	124
4.6.5	采样时间偏移量的影响	127
第5章	盲分离和盲均衡之间的关系	131
5.1	问题描述	131
5.1.1	源分离	131
5.1.2	解卷积	132
5.1.3	附加信息	133
5.1.4	比较	134
5.2	算法关系	134
5.2.1	估计模型的选择	134
5.2.2	代价函数的选择	135
5.2.3	自适应算法的选择	137
5.3	基于多用户峭度优化准则的独立信号的盲分离	137
5.3.1	问题形成和假设	138
5.3.2	单用户均衡问题回顾	140
5.3.3	关于 BSS 的充分必要条件	142
5.3.4	MU - CM 方法	143
5.4	盲信源分离学习算法扩展到多信道盲解卷	144
5.4.1	各种方法的代数等价性	146
5.4.2	卷积作为乘法运算	146
5.4.3	多信道盲解卷的自然梯度学习规则	147
5.4.4	多信道盲解卷算法	148
5.4.5	多信道盲解卷算法的实现	149
5.5	盲信号处理的一些相关问题	150
参考文献		152

Contents

CHAPTER 1 Introduction	1
1.1 Blind Signal Processing	1
1.1.1 Mapping and Inverse Mapping	1
1.1.2 Convolution and Deconvolution	2
1.1.3 Basic Problem of Blind Signal Processing	2
1.2 Blind Source Separation	3
1.2.1 Mathematical Description for Blind Source Separation	3
1.2.2 Historical Review for Blind Source Separation	4
1.3 Blind Channel Equalization	5
1.3.1 Mathematical Description for Blind Equalization	5
1.3.2 Historical Review for Blind Equalization	6
1.4 Adaptive Filtering	7
1.4.1 Foundational Adaptive Filtering	7
1.4.2 Supervised and Unsupervised Adaptive Filtering	7
1.5 Three Fundamental Approaches to Unsupervised Adaptive Filtering	8
1.5.1 Bussgang Statistics	8
1.5.2 Higher Order Statistics	9
1.5.3 Information Theoretic Models	9
1.6 Structure of the Book	10
CHAPTER 2 Theoretical Foundation for Blind Signal Processing	12
2.1 Entropy and Information	12
2.1.1 Entropy	12
2.1.2 Kullback-Leibler Entropy and Mutual Information	13
2.1.3 Negentropy	15
2.1.4 Invertible Probability Density Transformations	16
2.2 Higher Order Statistics	17

2.3 Self-Organising Neural Networks	19
2.3.1 Linear Self-Organising Neural Networks	20
2.3.2 Non-Linear Self-Organising Neural Networks	21
2.4 Recursive Networks	21
2.5 Standard Gradient Adaptation	23
2.5.1 Parameters and Cost Functions	23
2.5.2 Steepest Descent	24
2.5.3 Stochastic Gradient Descent	25
2.5.4 Behavior of Gradient Descent Methods	26
2.6 Natural Gradient Adaptation	28
2.6.1 Euclidean and Riemannian Geometry	28
2.6.2 Natural Gradient Descent	31
2.6.3 Relationships to Other Methods	33
2.7 Simulation Examples for Natural Gradient Adaptation	34
2.7.1 Maximum Likelihood Estimation of a Noisy Sinusoid	34
2.7.2 Single Layer Perceptron Training	36
2.8 Principal Component Analysis	39
2.8.1 Eigenvalue decomposition	40
2.8.2 Estimation of the First Principle Component	43
2.8.3 Adaptive Principle Component Extraction Algorithm	45
CHAPTER 3 Blind Source Separation	50
3.1 Concretion for Blind Source Separation	50
3.2 Overview of Independent Component Analysis	52
3.2.1 Independent Component Analysis Basics	52
3.2.2 Ambiguities Associated with ICA	53
3.3 Independent Component Analysis Using Neural Networks	53
3.3.1 Prewhitening Process	54
3.3.2 Separation Process	55
3.3.3 Estimation of the ICA Basis Vectors	56
3.4 Contrast Functions for ICA	58
3.4.1 Noiseless Linear Mixing ICA	58
3.4.2 Contrast Functions Based Likelihood	58
3.4.3 Contrast Functions Based Mutual Information	59

3.4.4	Contrast Functions Based Information Maximisation	59
3.4.5	Contrast Functions Baed Cumulant	60
3.5	Non-Gaussianity in ICA Estimation	62
3.5.1	Non-Gaussian Is Independent	62
3.5.2	Measuring Non-Gaussianity by Kurtosis	63
3.5.3	Measuring Non-Gaussianity by Negentropy	65
3.6	Valid Algorithms for Blind Source Separation	67
3.6.1	Information Maximisation	67
3.6.2	Minimise the Mutual Information	69
3.6.3	Equivariability of Natural-Gradient Learning Algorithm	70
3.6.4	Simulation; Separation of Communication Signals	71
3.6.5	Simulation; Separation of Audio Signals	75
3.6.6	Fast Fixed-Point Algorithm for ICA	78
3.6.7	Simulation; Separation of Image Signals	80
3.7	Blind Source Separation Algorithm with Kutosis	
	Adaptive Learning Rate	83
3.7.1	On Learning Rate	83
3.7.2	Kurtosis Adaptive Learning Rate	84
3.7.3	Computer Simulation	86
3.8	Blind Extraction of Source Signals	87
3.8.1	Extraction Procedure for Single Source	88
3.8.2	Blind Extraction of Group of Sources	92
CHAPTER 4	Blind Channel Equalization	95
4.1	Conception of Channel Equalization	96
4.1.1	Channel Models	96
4.1.2	Minimum and Maximum Phase Channels	98
4.1.3	Equalizer Structures	98
4.1.4	Equalizer Adaptation Based on Training	99
4.1.5	Blind Adaptive Equalizer	100
4.2	Homomorphic Equalization	101
4.3	Blind Equalization for Digital Communication	
	Channels	103
4.3.1	LMS Blind Equalization	105
4.3.2	Equalization of a Binary Channel	107

4.4	Equalization Based on Higher-Order Statistics	108
4.4.1	Blind Equalization Based on Higher-Order Cepstrs	108
4.4.2	Bi-Cepstrum	110
4.4.3	Tri-Cepstrum	111
4.5	Constant-Modulus Algorithm for Baud-Rate Spaced Equalizaer	113
4.5.1	Condition of Channel Equalization	113
4.5.2	Constant-Modulus Algorithm	113
4.5.3	Modified Constant-Modulus Algorithm	114
4.5.4	Simulation and Performance Comparison	114
4.5.5	Performance Analysis for MCMA	118
4.6	Constant-Modulus Algorithm for Fractionally Spaced Equalizaer	121
4.6.1	Meaning of Fractionally Spaced Equalizaer	121
4.6.2	Single Input Multirate Output Channel Models	122
4.6.3	Fractionally Spaced MCMA	124
4.6.4	Computer Simulation Experiments	124
4.6.5	Influence of the Timing Offsets	127
CHAPTER 5	Relationships Between Blind Source Separation and Blind Channel Equalization	131
5.1	Problem Descriptions	131
5.1.1	Source Separation	131
5.1.2	Deconvolution	132
5.1.3	Additional Information	133
5.1.4	Comparison	134
5.2	Algorithmic Relationships	134
5.2.1	Choice of Estimation Model	134
5.2.2	Choice of Cost Function	135
5.2.3	Choice of Adaptive Algorithm	137
5.3	Blind Separation of Independent Sources Based on Multiuser Kurtosis Optimization	137
5.3.1	Problem Formation and Assumptions	138
5.3.2	The Single-User Equalization Problem	140
5.3.3	Necessary and Sufficient Conditions for BSS	142

5.3.4	The MU-CM Approach	143
5.4	Extension of BSS Learning Algorithms for Multichannel Blind Deconvolution	144
5.4.1	Algebraic Equivalence of Various Approaches	146
5.4.2	Convolution as Multiplicative Operator	146
5.4.3	Natural-Gradient Learning Rules for Multichannel Blind Deconvolution	147
5.4.4	Multichannel Blind Deconvolution Algorithms	148
5.4.5	Implementation of Algorithms for MBD	149
5.5	Problems Concerning with Blind Signal Processing	150
References		152

第1章 绪论

盲信号处理(Blind Signal Processing, BSP)是20世纪最后10年迅速发展起来的一个研究领域^[1]。BSP的研究涉及人工神经网络、统计信号处理和信息论的有关知识,具有重要的理论和应用价值,受到相关领域研究者的重视。BSP问题是一个无监督自适应学习问题,这是因为失真的和带噪的观察数据在学习过程中不需要期望响应,观察数据中的统计量是唯一可利用的信息。因此,在现代通信和信息处理系统的发展中,盲信号处理将起到重要的作用,它具有广泛的应用范围。盲信号处理涉及到无监督学习问题的许多方面,本书重点研究盲信源分离和盲信道均衡的基础理论和应用,以及它们之间的相互关系。

盲信号处理问题可粗略地表述为:当传输信道特性未知时,从一组传感器阵列或转换器的输出信号中分离或估计源信号的波形。因为是在缺乏混合系统和(或者)滤波过程参数的情况下进行源信号估计的,所以盲信号处理看起来似乎有点不可思议,也很难想象能将源信号完全估计出来。

事实上,在缺乏某些先验知识时是不可能唯一地确定源信号的。然而,在允许一定程度上的不确定性时,对源信号加以估计则通常是可能的。用数学术语来说,这种不确定性和模糊性可以看做是对被估计源信号的任意比例的伸缩、排序或时滞,但依然保留了源信号的波形信息。尽管这种不确定性使盲信号处理具有一定的局限性,但在许多实际应用中它并非关键问题,因为源的大量相关信息蕴含在源信号的波形中,而不是信号的振幅或者系统输出的排列顺序中。

有必要说明标准的逆辨识问题与盲信号处理的主要区别。在基本的线性辨识或逆系统问题中,可以使用输入(源)信号,其目的是通过源信号与输出信号之间的均方误差来估计线性动态系统的逆系统。而在BSP问题中,源信号(通常假设各源是统计独立的)是不可能直接获取的。因此,要设计一个合适的非线性滤波器,用它来估计需要的信号。

1.1 盲信号处理

1.1.1 映射和逆映射

映射的定义^[2]:设 X 与 Y 是两个非空集,如果存在一个对应规则 f ,使得对