

中国科学院科学出版基金资助出版

信息科学技术学术著作丛书

盲源分离 理论与应用

余先川 胡丹 著



科学出版社

中国科学院科学出版基金资助出版

信息科学技术学术著作丛书

盲源分离理论与应用

余先川 胡 丹 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书对盲源分离算法进行了全面、系统的论述,并采用理论与应用实例分析相结合的方法,梳理了盲源分离方法自提出以来获得的各项重要研究成果。全书共15章,包括盲源分离基础、盲源分离的核心算法、盲源分离的前沿算法与应用三大部分内容,书中涉及大量应用实例,并首次对非负矩阵分解和稀疏成分分析进行了系统的介绍。

本书可作为信号处理、图像(含影像)处理、数据挖掘、模式识别、地学信息等专业研究生信息处理课程教材,也可供高等院校有关专业师生以及从事盲源分离算法研究与应用的科研工作者阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

盲源分离理论与应用/余先川,胡丹著.--北京:科学出版社,2011
(信息科学技术学术著作丛书)
ISBN 978-7-03 029951 2

I. 盲… II. ①余… ②胡… III. 信号处理 IV. TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 003248 号

责任编辑:张艳芬 王志欣/责任校对:钟 洋

责任印制:赵 博/封面设计:鑫联必升

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

x

2011年1月第 一 版 开本 B5(720×1000)

2011年1月第一次印刷 印张:19 1/2 插页:17

印数 1—2 500 字数:423 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

精彩纷呈的鸡尾酒会上,朋友间聊天的声音、酒杯碰撞的声音、会场中隐约的音乐声混杂在一起传入麦克风,如何从中找到你感兴趣的声音呢?

遥感影像分析中,地物信息、矿物信息和各种干扰混杂其间,如何从接收到的信号中确定地物信息以及矿物信息呢?

军事通信中,现代战场环境恶劣而复杂,如何从混杂的无线电信号中准确截获、分离和识别敌方和我方信息呢?

.....

这正是盲源分离想解决和正在解决的问题。

随着网络、通信和计算机技术的飞速发展,我们迈入了一个数字化、信息化的时代,而数字信号处理则是其关键环节之一。作为盲信号处理的主要内容,盲源分离是指在未知源信号和传输通道参数的情况下,根据输入源信号的统计特征,仅由观测信号检测并分离出源信号中各个成分的过程。它涉及信息论、统计信号处理和人工神经网络等多个方面的知识,在遥感影像处理、移动通信、语音处理、生物医学工程、经济学、声呐和地震信号处理等众多领域有着极富吸引力的应用前景。盲源分离虽是近 20 年来才发展起来的新兴技术,但已因其重要的理论价值和广泛的应用前景而迅速成为各领域学者关注的热点。

1984 年 4 月,法国学者 Herault 和 Jutten 提出了递归神经网络模型和基于 Hebb 学习律的学习算法,实现了两个信号源的盲分离,其广泛的应用背景立刻吸引了学者们的关注,由此揭开了信号处理领域的新篇章,即盲源分离问题的研究。经过 20 余年的蓬勃发展,盲源分离在理论基础和实际应用上均取得了长足进展,目前已形成了以基于信息熵或似然估计的盲源分离算法为基础,以独立成分分析为核心,以非负矩阵分解、稀疏成分分析等新兴算法为前沿的理论体系,并在信号处理、图像处理和语音处理等方向获得了成功的应用。

北京师范大学空间多源信息融合与分析校级重点实验室(前身是北京师范大学信息科学与技术学院空间信息处理研究中心)自 1998 年以来,以国家 863 项目、国家自然科学基金项目和北京市自然科学基金项目为依托,致力于对盲源分离优化算法的研究及其在影像特征信息分析、影像融合、影像混合像元分解、影像目标识别等遥感信息处理,fMRI 医学影像处理,地球化学、地球物理信息处理,矿产资源预测以及致矿信息识别等领域的应用研究,取得了一定的理论成果。同时,在研究和学习过程中,我们发现,目前国内外尚无集中介绍盲源分离理论基础、相关核

心算法与前沿算法、应用实例的参考书,这也正是我们出版此书的主要原因。

本书是作者在多年从事该领域科研、教学的基础上,参阅大量国内外相关论著完成的。书中所列实验室相关成果是在余先川、胡丹、王桂安、方李根、张楠、张婷、邹伟、任嘉勉、吉娜、王仲妮、郝壁欣、杨春萍、黄智、彭迪、龙四亮、白一青、俞晨、付妍、杨萌、张君兰、罗烨、康增基、方怡、周鑫、裴文静等研究团队的共同努力下完成的,本书写作过程也离不开实验室全体师生的辛勤付出,尤其是贺辉、安卫杰(第1~4章),代莎、倪峰(第5~13章),曹婷婷(第14章),初晓凤(第15章)在书稿的整理中做了许多重要的工作。我们希望本书的问世,有助于读者较为系统地认识盲源分离算法与应用。

在前期工作积累,书稿的酝酿、撰写和出版过程中,我们得到了中国科学院科学出版基金、国家自然科学基金(40372129,40672195)、国家863计划(2007AA12Z156)、教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-06-0131)、北京市自然科学基金(4062020,4102029)、北京师范大学校级重点实验室基金等资助,并得到了北京师范大学李小文院士,中国科学院电子学研究所吴一戎院士,加拿大约克大学、中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室主任成秋明教授,吉林大学吴国学教授,北京师范大学彭望球教授、朱朝喆教授、丁国盛副教授,《地球物理学报》刘少华编审,中国地质科学院矿产资源研究所肖克炎研究员,广东地勘局722地质大队刘石华、李鸿镇高级工程师,广东地勘局719地质大队刘立文队长等的真诚帮助,在此一并致以衷心的感谢。

本书介绍的一些算法已被集成到软件系统中,如有读者对这部分内容感兴趣,可与北京师范大学空间多源信息融合与分析实验室余先川教授联系(yuxianchuan@163.com)。

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,恳请批评指正。

余先川 胡 丹

2010年8月

目 录

《信息科学技术学术著作丛书》序

前言

第 1 章 导论	1
1.1 盲源分离概述	1
1.2 盲源分离的发展历史	3
1.3 盲源分离应用	7
1.4 本书结构与章节安排	9
参考文献	10

第一部分 盲源分离基础

第 2 章 盲源分离的数学基础	17
2.1 矩阵分析与运算	17
2.1.1 行列式及其性质	17
2.1.2 矩阵的相关概念	18
2.1.3 矩阵运算公式	18
2.2 概率论基础——高阶统计量	24
2.3 信息论基本概念	28
2.4 距离测度	31
2.5 信号盲源分离问题的可解性	33
参考文献	34
第 3 章 盲源分离的基础模型及经典算法	35
3.1 数学模型	35
3.2 盲源分离算法	36
参考文献	41
第 4 章 盲源分离的算法评价标准	43
4.1 目标函数评价标准	43
4.2 相关性评价标准	46
4.3 信噪比评价标准	46
参考文献	47

第二部分 盲源分离的核心算法——独立成分分析算法与应用

第 5 章 独立成分分析	51
5.1 ICA 概述	51
5.2 ICA 的原理	55
5.3 本章小结	69
参考文献	69
第 6 章 快速独立成分分析算法与应用	72
6.1 概述	72
6.2 FastICA 算法	75
6.3 应用与分析	78
6.4 本章小结	103
参考文献	104
第 7 章 极大似然独立成分分析算法与应用	105
7.1 概述	105
7.2 极大似然 ICA 算法	107
7.3 应用与分析	112
7.4 本章小结	116
参考文献	116
第 8 章 过完备独立成分分析算法与应用	117
8.1 过完备 ICA 算法	117
8.2 应用与分析	120
8.3 本章小结	124
参考文献	124
第 9 章 核心独立成分分析算法与应用	126
9.1 KICA 算法	126
9.2 应用与分析	128
9.3 本章小结	133
参考文献	133
第 10 章 自然梯度 Flexible ICA 算法与应用	135
10.1 自然梯度 Flexible ICA 算法	135
10.2 应用与分析	138
10.3 本章小结	147
参考文献	148

第 11 章 非负独立成分分析算法与应用	149
11.1 非负 ICA 算法	149
11.2 应用与分析	150
11.3 本章小结	164
参考文献	164
第 12 章 约束独立成分分析算法与应用	166
12.1 概述	166
12.2 CICA 算法	167
12.3 应用与分析	171
12.4 本章小结	177
参考文献	177
第 13 章 优化独立成分分析算法与应用	179
13.1 概述	179
13.2 优化 ICA 算法	180
13.3 应用与分析	184
13.4 本章小结	197
参考文献	197

第三部分 盲源分离的前沿算法与应用

第 14 章 稀疏成分分析算法与应用	201
14.1 概述	201
14.2 SCA 的基础算法	207
14.3 基于线性聚类的稀疏成分分析(LC-SCA)	209
14.4 基于平面聚类的稀疏成分分析(PC-SCA)	223
14.5 基于平面聚类的过完备稀疏成分分析(PCO-SCA)	228
14.6 基于小波变换和稀疏成分分析(WL-SCA)的图像盲分离	234
14.7 基于 SCA 的遥感影像分类	236
14.8 本章小结	242
参考文献	242
第 15 章 非负矩阵分解算法与应用	247
15.1 概述	247
15.2 NMF 算法	251
15.3 应用与分析	272
本章小结	300
参考文献	301
彩图	303

第 1 章 导 论

1.1 盲源分离概述

盲源分离(blind sources separation, BSS)是 20 世纪 80 年代中后期迅速发展起来的一种功能强大的信号处理方法,盲源分离作为人工神经网络、统计信号处理、信息理论相结合的产物,现已成为众多领域中研究与发展的重要课题,特别是在生物医学、语音与通信、图像处理、地球科学、计量经济学、文本数据挖掘等方面均有突出的贡献。目前,盲源分离问题已经成为国际上信号处理和人工神经网络等学科领域的一个研究热点,具有非常重要的实用价值。

所谓盲源分离,是信号处理中一个传统而又极具挑战性的问题,盲源分离是指仅从若干观测到的混合信号中提取、恢复(分离)出无法直接观测的各个原始信号的过程,这里的“盲”是指源信号未知(不可观测),并且混合系统特性也事先未知或只知其少量先验知识(如非高斯性、循环平稳性、统计独立性等)这两个方面。在科学研究和工程实践应用中,很多观测信号都可以看成是多个源信号的混合,也就是说,被观测的混合信号是一系列传感器的输出,而每一个传感器接收到的是源信号的不同组合。盲源分离的主要任务是从观测数据中恢复出我们感兴趣的源信号。

典型的例子就是“鸡尾酒会”问题(cocktail party),其描述的是:假设你在参加一个鸡尾酒会,现场有各种各样的声源,如聊天声(而且可能是用不同的语言)、音乐声,窗外可能还有汽笛声。如果在不同的位置有足够的麦克风去记录这些声音,各个麦克风记录的信号是具有不同权重的说话者语音信号的混合信号(图 1-1)。

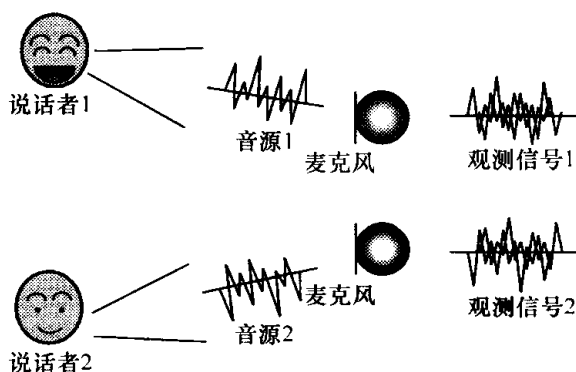


图 1-1 信号混合示意图

尽管现场有很多干扰,你依然能够将注意力集中在你朋友所说的话上,甚至你还可以边谈话边听音乐等。在事先不知道声源的任何信息也不知道麦克风位置的情况下,如何仅仅从麦克风接收到的语音信号中分离出所需要的说话者的声音?盲源分离就是为了解决此类问题应运而生的(Holland, 1978; Bylund, 2001; 斯华龄等, 2002; Haykin, et al, 2005)。

盲源分离更一般的表述如下:

已知从多输入多输出(MIMO)非线性动态系统(SISO, SIMO 是特例)中测得的传感器信号为 $x(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_m(k)]^T$, 要求找到一个逆系统, 以重构估计原始的源信号 $s(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_n(k)]^T$ 。源信号 $s(k)$ 未知, 源信号如何混合得到观测信号也未知, 这体现了求解问题的“盲”, 输出可由式(1-1)表达

$$y(k) = Wx(k) = WAs(k) = Cs(k)\pi \quad (1-1)$$

式中, $C=WA$ 为一个 $r \times n$ 的矩阵, 称为混合-分离矩阵。

通用盲源分离处理模块如图 1-2 和图 1-3 所示。

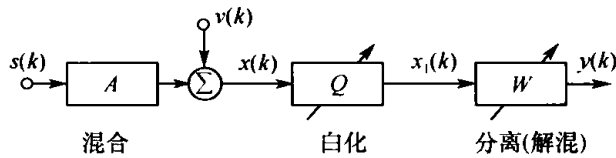


图 1-2 通用盲源分离模型处理模块图

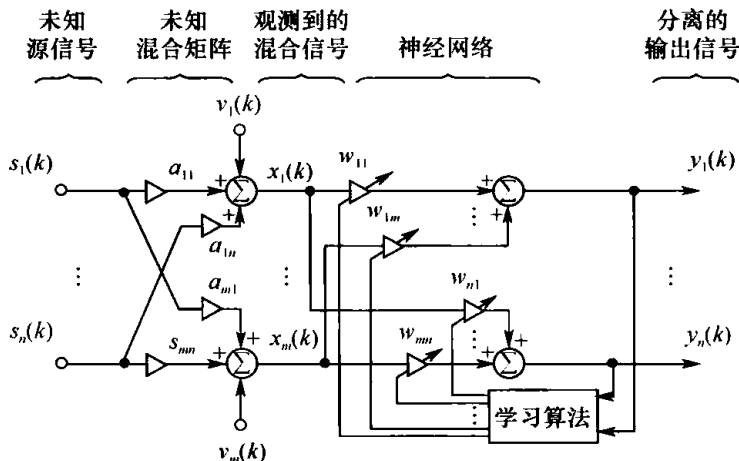


图 1-3 线性盲源分离处理详细模型示意图

对于过完备($m < n$)问题, W 可能不存在。此时需要尝试识别混合矩阵 A , 然后利用未知源信号的独立性或者稀疏性等先验知识估计源信号。

最简单的情况, 如果 $x(k)$ 是 $s(k)$ 的线性瞬时混合, 即 $x(k) = H \times s(k)$, H 是

一个 $m \times n$ 的混合矩阵,盲源分离问题可简化为求一个 $n \times m$ 的解混矩阵 W ,使得输出

$$y(k) = Wx(k) \approx s(k) \quad (1-2)$$

式中, $y(k)$ 为真实源信号的一种估计和近似。

盲源分离方法最大的魅力在于它可以充分考虑源信号的统计独立性、稀疏性、时空无关性和光滑性等特性来估计不同信号源,从而提供各种稳健和高效的算法(Choi,2005)。其应用基本处理步骤如图 1-4 所示。由图可知,为了提取可靠、重要和具有物理意义的成分,对数据的预处理和后处理模型非常重要。因此,盲源分离的大部分方法是依据一定的先验信息或相关理论构造目标函数的无监督学习方法。其中独立成分分析(independent component analysis,ICA)作为一种盲源分离方法,它已成为信号处理和数据分析的有力工具;非负矩阵分解(non-negative matrix factorization,NMF)和稀疏成分分析(sparse component analysis,SCA)也开始在信号分离和相关应用中显露出强大的数据分析能力。ICA 又称独立元分析、独立分量分析,是基于信号的高阶统计特性的分析方法,能够分解出相互独立的各信号分量,是一种盲源信号分离方法。NMF 则寻求带非负约束的局部特征来表达源数据,确定了目标函数以后,再用一定的算法作寻优处理以得到源分离矩阵。SCA 通常在时频域内,尽可能通过稀疏成分的混合来表达源数据。而传统的主成分分析(principal component analysis,PCA)通过保留代表源数据的 80% 以上信息的主要特征实现数据的降维。不同的混合方式,构造目标函数的原则基本相同,不同的是寻优算法各异(Lee,et al,2000;陈锡明等,2008)。

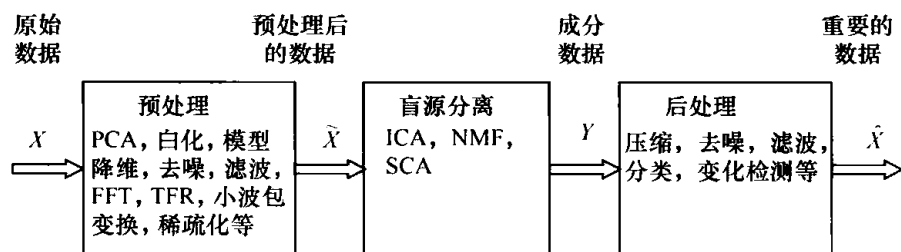


图 1-4 利用盲源分离进行高效分解和信号提取的基本步骤

FFT(fast fourier transform)为快速傅里叶变换;TFR(time frequency representation)为时频表示

1.2 盲源分离的发展历史

一般认为,盲源分离问题的最早实质性研究开始于 1986 年,法国学者 Herault 和 Jutten 在美国举行的 Neural Network for Computing 会议上提出了 H-J 算法,即反馈神经网络模型和基于 Hebb 学习规则的学习算法(Herault,et al,1986),以

实现两个独立源信号混合的分离。H-J 算法能够用搜索的方法分开混合在一起的两个统计独立的源信号。Herault 和 Jutten 的工作翻开了信号处理领域的新篇章,从此盲源分离问题得到了学者们的广泛重视。

事实上,解决盲源分离问题是一项非常艰巨的任务,因为我们不知道源信号的任何信息。在 Herault 和 Jutten 提出的算法中,只做了两个假设:一是假设源信号是统计上相互独立的,二是假设已知源信号的统计分布特征。如果假设源信号是高斯分布的,则很容易看出这个盲源分离问题没有一般解,因为高斯分布的任何线性混合仍然是高斯的。用 H-J 网络模型解决盲源分离问题,需要假设源信号是亚高斯信号,也就是说源信号的峭度值(kurtosis)要小于 0(高斯信号的峰度值为 0)(Cohen, et al, 1992)。

由于关于信号源分离问题的可解性以及可解条件等还没有得到解决,Herault 和 Jutten 及之后的很多学者针对 H-J 算法的以上不足进行了大量深入的研究工作。Linsker 发表的文章(Linsker, 1988, 1989)提出了最大互信息准则,该准则的基本形式非常适合建立自组织模型和特征映射。Giannakis 等(Giannakis, et al, 1987)在 1987 年提出了盲源分离的可辨识问题,且引入了三阶累积量,但他们的算法需要穷举的搜索计算。1989 年,在美国科罗拉多州举行的与 ICA 研究领域相关的高阶谱分析国际会议上,Cardoso 和 Comon 各自发表了在 ICA 发展史上较早的论文(Cardoso, 1989; Comon, 1989),为 ICA 问题给出了一个一般性的较为清晰的框架——只给定“源信号是统计上相互独立的”这个条件,就可以得到统计上相互独立的源信号,开启了 ICA 研究领域的先河。从此,ICA 逐步完善起来。而 Herault 和 Jutten 于 1991 年在 Signal Processing 上发表的关于盲信号分离的经典文章,首次将人工神经网络算法用于盲源分离(Herault, et al, 1991),从而开启了一个新领域。虽然他们的学习算法是启发式的,且没有明确指出需利用观测信号的高阶统计信息,但是其迭代计算公式已经具备后来算法的雏形。

从此以后的 20 多年中,盲源分离问题已成为信号处理领域研究的热点,研究工作也越来越深入,理论和实际应用都得到了很大发展。1994 年,Comon (Comon, 1994)提出了著名的基于最小互信息的 ICA 方法;1995 年, Bell 和 Sejnowski(Bell, et al, 1995)提出了基于信息最大化准则的最大熵法;该算法进一步由日本学者 Amari 和他的合作者用自然梯度法加以完善,其本质上是极大似然估计方法(Amari, 1996, 1998)。几年以后,芬兰学者 Hyvärinen 和 Oja 提出了 Fixed-Point 算法(或称为 FastICA 算法)(Hyvärinen, et al, 1997, 2000; Hyvärinen, 1999),因为其具有较快的收敛速度而在大规模数据处理中得到了广泛应用。到目前为止,标准的 ICA 算法已经较为完善,如有快速算法(FastICA)、Infomax 算法、扩展的信息最大化算法(Girolami, et al, 1999; Lee, et al, 1999)和 EASI 算法等(Cardoso, et al, 1996)。标准的 ICA 算法使用理想化的数学模型,目

前人们重点研究的是扩展的 ICA,如具有噪音的 ICA(Hyvärinen, et al, 2001; Zhong, et al, 2004)、稀疏和过完备表示(overcomplete representations)(Lewicki, et al, 2000; Girolami, 2001; Zhong, et al, 2004)、非线性的 ICA(Hyvärinen, et al, 1999; Lappalainen, et al, 2000; Lee, et al, 1997; Taleb, et al, 1997; Harmeling, et al, 2001, 2003)、非平稳信号的 ICA(Pham, et al, 2000; Sanchez, 2002)和卷积 ICA(Hyvärinen, 1998, 2001)。

随着数字信号处理理论和技术的发展以及相关学科的不断深入,大量有效的盲源分离算法不断被提出,使盲源分离问题逐渐成为当今信息处理领域中最热门的研究课题之一。

国际上专门的盲源分离研讨会(ICA'99)——独立成分分析和盲源分离的国际学术会议于 1999 年 1 月在法国首次召开,目前已成功举办了八届,成了盲源分离研究者的重要交流阵地,有力地推动了盲源分离的发展。国际声学、语音和信号处理大会(IEEE International Conference on Acoust, Speech, and Signal Processing, ICASSP)每次都有关于盲源分离的专题,且信号处理界的权威刊物 IEEE Transaction on Signal Processing 以及 Signal Processing 中,盲源分离的文章也频繁出现。对于盲源分离问题,随着应用领域的不断扩展,学者们提出了很多算法,每种算法都在一定程度上取得了成功。从算法角度,盲源分离算法可以分为自适应算法和批处理算法;从假设条件角度,其可分为基于源信号统计独立的算法、基于源信号稀疏的算法和带有非负约束的矩阵分解算法;从代价函数或准则的角度,其又可分为基于二阶统计量的时空无关方法(如 AMUSE 算法)、基于高阶统计量的方法、基于神经网络的方法和基于非线性函数的方法等。

盲源分离问题发展至今,已有的大部分算法解决的是线性瞬时混合问题,一些具有良好性能的成功算法,如 ICA 系列算法已经被应用于信号处理领域、生物医学信号处理(EEG、MEG 等)、语音识别系统和地震预报等领域。近几年,解决盲源分离问题的非线性方法和技术(Oja, 1997)得到了很大发展,其中非线性混合模型的算法发展最为全面迅速,Jutten 和 Babaie-Zadeh 等提出许多算法解决 PNL 模型的盲分离问题(Babaie-Zadeh, et al, 2004),并在传感器阵列信号处理、微波通信、卫星通信和很多生物系统中具有实际的应用价值。Valpola 等将贝叶斯集成学习理论(Bayesian ensemble learning)引入非线性盲源分离中,并取得了较好的结果(Valpola, et al, 2002)。一般非线性混合信号的贝叶斯盲源分离方法是近年的研究热点之一。基于核的非线性盲源分离算法(Martinez, et al, 2003)和局部线性盲源分离等都备受重视。然而由于非线性问题本身的复杂性,目前还没有一个普遍适用的算法,针对不同的实际问题需要采用不同的算法来解决,因而出现了一系列的针对不同模型的非线性算法(Taleb, et al, 1998; Woo, et al, 2002)。随着人工神经网络的发展,径向基函数(RBF)网络(Tan, et al, 2001)、多层感知器(MLP)网

络(Woo, et al, 2002)、多项式(PNN)网络(Woo, et al, 2004)、遗传算法(GA)(Rojas, et al, 2001)等因其灵活的非线性能力而得到了人们的广泛关注,因此可以利用人工神经网络来解决非线性问题。在非线条件下,RBF 网络解混器具有最快的收敛速度,但信号恢复准确性下降较快。MLP 网络恢复信号最为准确,但计算复杂度最大。PNN 网络利用灵活可变的隐藏神经元激活函数来防止“过优化”网络的出现,并且使解的结构更加规则化。选择神经网络时需要估计速度、精确度和复杂度,根据实际应用选择最为合适的。其中,MLP 网络与其他网络相比更具一般性,所以当没有混合系统的先验知识时 MLP 网络更适合。而 RBF 网络快速收敛,当考虑速度时优先选择 RBF 网络。PNN 网络提供明确的分离性,但需要信号限制等先验知识(Woo, et al, 2004)。

目前,盲源分离方法已经形成三大新主流方法,即 ICA、NMF 和 SCA。本书后续章节将对它们作较为详细的介绍,此处不再赘述。

国际上,研究盲源分离问题的重要机构和著名学者主要有:美国萨克学院计算机神经生物学实验室学者 Sejnowski 和 Bell,麻省理工大学教授 Seung,克拉克森大学教授 Paatero;日本理化学研究所脑科学研究中心学者 Amari 和 Cichowski;芬兰阿尔托大学理工学院(原赫尔辛基理工大学)的 Oja 和 Hyvärinen;法国国家科学研究中心学者 Comon 和 Cardoso 等。国际上,盲源分离理论相关重要著作有:Independent Component Analysis: Theory and Applications(Lee, 1998);Independent Component Analysis(Hyvärinen, 2001);Adaptive Blind Signal and Image Processing(Cichowski, et al, 2002);Independent Component Analysis: A Tutorial Introduction(Stone, 2004);Handbook of Blind Source Separation, Independent Component Analysis and Applications(Comon, et al, 2010)。

在国内,信号处理界紧跟国际盲信号处理的研究动态。1996 年以后,相继有清华大学、西北工业大学、东南大学、上海交通大学、西安电子科技大学、华南理工大学、北京师范大学、中国科学院心理研究所等单位开始盲信号处理机理及应用方面的研究。张贤达、何振亚、凌燮亭等学者较早地涉足了盲源分离的研究(凌燮亭, 1996;汪军等, 1997;张贤达等, 2001, 2002)。从 2000 年开始,大批学者开始将目光转向该领域,并将盲源分离理论与其各自的研究领域相结合,提出了许多具有创新性的新方法(刘琚等, 2001;张洪渊等, 2001;杨俊安等, 2002;苏野平等, 2002;章晋龙等, 2004;游荣义等, 2004;李良敏, 2005;何文雪等, 2005),有力地推动了国内盲源分离理论的研究。数本较系统性地介绍盲源分离理论的书籍也相继出版,如《人工神经网络与盲信号处理》(杨行峻等, 2003)、《盲信号处理与应用》(张发启等, 2006)、《盲信号处理》(马建仓等, 2006)、《独立成分分析》(周宗潭等, 2007)、《盲信号处理——理论与实践》(史习智等, 2008)等。与此同时,一些与盲源分离理论相关的研究小组也相继成立,研学论坛(<http://bbs.matwav.com>)也开辟了用

于盲信号处理讨论的专版,大大方便了国内盲源分离研究与交流。

1.3 盲源分离应用

1. 语音信号分离与识别

语音信号的分离与识别是盲源分离最早、最经典的应用。在该应用中,观测信号是几个语音信号混叠在一起的混合信号,盲源分离算法的研究目的就是要将源信号分离出来。在一个实际的语音识别系统中,观测到的信号是源语音信号与传感器及周围环境共同作用产生的冲激响应的卷积结果。显然传感器的性质和周围环境一样是不固定的。例如,电话的形状、失真度的不同都会给传输性质带来很大的差异。麦克风所使用放大器的不同、听筒所在位置的不同,以及发声区域位置的不同都会使得语音传输性质发生改变。一个只针对某一传感器在某一特定地点的辨识器,在换了环境或辨识对象时,就可能会工作得很糟糕。所以,制造辨识器时就不能对传输特征做个别规定。这时,盲源分离就显得很重要。

此外,卷积盲源分离在音乐中也有较好的应用。Douglas(Douglas,2002)利用卷积盲源分离技术从一段无伴奏合唱录音中分离出两种声音。Vincent(Vincent,2005)采用ICA技术根据音频配乐分离出不同的乐器以实现对音乐录音的交互式修改。复调音乐的识别是个很复杂的问题,三菱研究所和麻省理工学院的科研人员合作,利用NMF从演奏的复调音乐中识别出各个曲调,并将它们分别记录下来。这种采用NMF算法的方法不仅简单,而且无须基于知识库(Kawamoto, et al,2000)。

2. 数据通信与阵列信号处理

在无线数字通信中,盲源分离也有较广泛的应用(张昕等,2000; Cances, et al,2006)。国内外一些学者提出采用天线阵接收系统和空间滤波,利用接收器信号的差异,通过盲源分离算法,实现同信道多用户信号的分离,可以在同一个信道中同时传送多个用户信号,从而大大提高了信道容量。在CDMA系统中,多个用户共享同一个频道带宽且同时传输,不同的用户可通过扩频码区分,但由于多路衰减到达接收端的信号不再是正交的,此时利用ICA可以帮助改善接收器端信号的信噪比(SNR)。2006年,长期致力于模仿人脑信息处理机制和信号分离技术(ICA)研究的日本理化学研究所和Chaosware公司通过模仿大脑在嘈杂环境中也能分辨特定声音的机制,开发出可精确分离手机混合电磁波的新技术。这项技术可大大提高手机通信的传输速度和清晰度(<http://www.sina.com.cn>,2006年12月16日10:29 新华网)。

在阵列传感器中,各个传感器接收到混合信号,而源信号与混合特性完全未知,这是一个典型的盲源分离应用问题。因此,在海洋声呐探测以及被动雷达探测应用中都采用了盲源分离技术(张安清等,2003),也有人研究雷达信号的盲源分离来探测隐形飞机等。

3. 图像处理与识别

盲源分离在图像处理领域应用十分广泛。目前,盲源分离技术已广泛应用于图像特征提取、人脸识别、运动目标检测、数字水印、图像去噪、图像分离、图像恢复等方面(Tukr, et al, 1991; Bartlett, et al, 1998, 2002)。例如,在图像恢复和重构问题中,可用盲分离的方法从污染的图像中恢复出图像原本的面目,消除获取图像时各种因素(如相机抖动、镜头变形、传输噪声叠加等)造成的图像质量问题(马建仓等, 2006)。

4. 地学空间信息处理

在地学空间信息处理方面,盲源分离技术已经应用于遥感数据处理的许多方面,其中主要包括遥感影像融合、混合像元分解、遥感影像分类与识别。斯华龄等提出了一种多通道、单像素无监督学习的盲源分离方法,将其应用于遥感图像处理,获得了巨大成功(斯华龄等, 2002)。在影像融合方面,利用 PCA、NMF、ICA、SCA 等方法能够取得理想的融合效果(Wang, et al, 2007; 黄智等, 2008; 王仲妮等, 2008)。在矿产预测中,盲源分离方法可以很好地应用于地球物理和地球化学数据分析中(余先川等, 2009; 曹恒智等, 2009; 刘石华等, 2007)。盲源分离技术也可应用在地震勘探中(刘喜武等, 2003),通过对土壤进行炸药爆破,然后利用盲源分离技术可以从接收到的反射或衍射信号中区分不同地层的岩性。

5. 生物医学信号处理

在生物医学领域,检测的传感器较多,因此非常适合盲源分离的模型,其应用也非常广泛和深入。盲源分离可应用于心电图(electrocardiograph, ECG)、脑电图(electroencephalogram, EEG)、肌电图(electromyogram, EMG)、脑磁图(magnetoencephalograph, MEG)等信号分离,以及听觉信号分析、功能磁共振图像(functional magnetic resonance imaging, fMRI)分析等。在 EEG 信号分离应用(Cichocki, et al, 2002; Choi, 2005; Brookings, et al, 2009)中盲源分离是主流分析方法。例如,对胎儿的 ECG 信号处理,由于从孕妇身上测到的 ECG 信号实际上是包含了孕妇和胎儿各自的 ECG 信号,且传输介质参数未知,这是一个盲源分离的典型应用。使用盲源分离方法,可将孕妇和胎儿各自的 ECG 信号分离开来,从而为诊断提供了准确的数据。又如,ICA 已经成功地应用于脑功能核磁共振成像信号

的处理,国内在这方面的研究也比较多,其工作主要是实现空间 ICA 的盲源分离,提取脑内的特征信号(范丽伟等,2003;Long,et al,2003; Yu,et al,2007; Yang,et al,2008)。

由于 NMF 的分解不出现负值,所以许多学者将 NMF 应用到遗传学和药物发现中。实验结果表明,采用 NMF 分析基因 DNA 的分子序列可使分析结果更加可靠。同样,用 NMF 来选择药物成分还可以获得最有效的且副作用最小的新药物(Gao,et al,2005)。

6. 文本分析与处理

智能文本处理的核心问题是以一种能捕获语义或相关信息的方式来表示文本,但是传统的常用分析方法仅仅是对词进行统计,而不考虑其他的信息。随着盲源分离技术的广泛应用,有学者将 NMF 用于文本分析和处理当中,能够获得更好、更精确的处理结果(Xu,et al,2003)。采用 NMF 分解词-文本矩阵来降低词-文本矩阵的维数,滤除噪声特征项,从而为定义一种有效的相似度提供可能;另外,NMF 通过矩阵近似来获取同义词之间的关联,将文本向量转换成概念空间上的表示。

实际上,盲源分离技术的应用远远超出上述几个方面,它已经超越了信号处理的范畴,如盲源分离还应用于金融数据分析、数据加密、化学反应分析等方面。

1.4 本书结构与章节安排

随着盲源分离方法在不断地充实与更新,盲源分离问题中的新内容和新应用急需进行系统的概括总结。然而,目前缺少集中介绍盲源分离理论基础、核心算法与前沿算法、应用实例的参考书。希望本书的出版能在相关领域起到抛砖引玉的作用。

本书对盲源分离算法进行了全面、系统的论述,并将理论与应用实例分析相结合,梳理了盲源分离方法发展以来获得的各项重要研究成果,以期推动盲源分离理论研究与应用的发展。

全书共 15 章,包括三大部分内容。

第 1 章:导论。主要介绍盲源分离的相关进展。

第一部分(第 2~4 章):盲源分离基础。该部分首先给出盲源分离的数学基础知识,包括矩阵运算、概率论基础以及信息论的基础知识。然后介绍了盲源分离的基础数学模型和经典算法。最后介绍了盲源分离的算法评价标准。

第二部分(第 5~13 章):盲源分离的核心算法——独立成分分析算法与应用。ICA 是近年来由盲源分离技术发展起来的一种多道信号处理方法。ICA 分为时