

空间电子信息科学与技术系列



盲信号分离技术及应用

Blind Signal Separation Technology and Application

陈 豪 周治宇 白 琳 温媛媛 方 海◎编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

非外借



空间电子信息科学与技术系列

盲信号分离技术及应用

Blind Signal Separation Technology and Application

陈 豪 周治宇 白 琳 温媛媛 方 海◎编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书主要讨论盲信号分离的基本概念、基础数学理论以及盲信号分离所遵循的各种模型和经典算法;还介绍了盲信号分离在一些特定情况下的应用,其中包括欠定和病态混合、与阵列信号处理相结合解决波束形成问题。

本书可以作为高等院校信息与通信工程专业的本科生、研究生的教学参考书,也可供从事卫星通信工程的技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

盲信号分离技术及应用/陈豪等编著. —上海:
上海交通大学出版社, 2018

大飞机出版工程

ISBN 978-7-313-20262-8

I. ①盲… II. ①陈… III. ①盲信号处理 IV.
①TN911.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 226462 号

盲信号分离技术及应用

编 著: 陈 豪 周治宇 白 琳 温媛媛 方 海

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 江苏凤凰数据印务有限公司

开 本: 710 mm×1000 mm 1/16

字 数: 289 千字

版 次: 2018 年 11 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-20262-8/TN

定 价: 98.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 17

印 次: 2018 年 11 月第 1 次印刷



版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 025-83657309

作者简介

陈豪(1944—),男,研究员、博士生导师,现任职于中国空间技术研究院西安分院。1965年毕业于中国科学技术大学无线电电子学系。参加工作以来,一直从事空间电子设备与系统的研制以及相关的理论研究,专业工作涉及卫星测控、卫星通信、信号处理、通信抗干扰技术等,曾获得国家科技进步特等奖、国防以及省部级科技进步奖多项。

周治宇(1979—),男,博士,现任职于中国空间技术研究院西安分院。长期致力于空间通信技术以及通信抗干扰方面的研究和应用,曾设计并实现多个卫星通信系统,已在国内外学术刊物和重要会议上发表论文十余篇。

白琳(1982—),男,博士,现任职于中国空间技术研究院西安分院,长期从事卫星通信中的干扰与抗干扰、通信信号处理、通信侦察等方面的工作,已在国内外学术刊物和重要会议上发表论文十余篇。

温媛媛(1980—),女,博士,现任职于中国空间技术研究院西安分院,长期从事盲信号分离、卫星通信抗干扰、雷达信号处理等方面的工作,目前在国内外学术刊物和重要会议上发表论文二十余篇。

方海(1983—),男,博士,现任职于中国空间技术研究院西安分院,研究方向为图像处理,从事空间信息处理方面的工作,在国内外学术刊物和会议上发表论文十余篇,授权国家发明专利十余项。

前 言

进入 21 世纪,人们对信息的依赖程度越来越强,信息已经渗透人类生活的各个方面,包括政治、经济、军事以及日常的娱乐、交流等。于是在信息技术领域出现了许多新的概念和创新性的技术,大数据、云计算、超级计算机、量子通信……琳琅满目,数不胜数。作为国家空间基础设施研究的部门,我们关心的不是信息本身,而是信息传递的载体。信息的爆炸带来信息量的剧增,输送信息载体也应发生革命性的变化,高通量通信卫星由此应运而生。但是如果量的问题解决了,质的问题,如保密、抗干扰同样需要解决。编写这本书的初衷,来源于我们所研究的有关卫星通信的抗干扰课题。

在通信技术的研究中,不可避免地要对抗干扰技术进行探讨,寻找以什么方式进行通信具有最高的频带利用率、最低的误码率以及能抗各种各样的干扰。因此,需要研究通信的体制、编码方式、各种抗干扰的手段。但是,在抗干扰技术的研究方面,无论是在频域、时域或空域方面,以不同的方式抑制干扰和抵消干扰是常用的方法。倘若认为通信信号存在于复杂的电磁环境中,并且它们与其他信号在时域上高度密集、频域上严重重叠,甚至与通信信号在频谱上完全对准,没有任何先验的知识,传统的抗干扰措施就会显得被动和盲目。

寻找适用复杂电磁环境中的抗干扰方法,变被动为主动,是通信抗干扰研究的一项重要课题。研究发现盲信号分离技术的引入,可以为抗干扰技术带来新的思路。当有用的通信信号与其他信号混合在一起的时候,如果不考虑它们是如何混合的,而采用一定的办法将混合的信号分离,这样可以不管信号是什么形式,也不需要任何先验信息,显然这种方法就有主动性。对于盲信号分离,敏感器的数量是值得关心的问题,在一些特殊环境下,在分离的信号众多的情况下,要实现敏感器多于信号数是很困难的。因此,欠定和病态情况是我们研究的重点。盲信号分离与阵列信号处理相结合解决空域的抗干扰问题是一种新颖的方

法,很值得关注。

本书是“空间电子信息科学与技术系列”书中的一本,共有9章。书的内容可分为三部分。第一部分是由第1、第2和第3章组成,主要对盲信号分离所涉及的基础知识进行必要的讨论。第二部分有第4、第5和第6章,这三章对盲信号分离在特定的数学模型下的基本算法做详细的分析和描述。第三部分由第7、第8和第9章组成,讨论了盲信号分离技术在不同领域内的应用。

参加本书编写的有:第1章为陈豪、周治宇,第2章为陈豪、周治宇,第3章为周治宇,第4章为周治宇、白琳,第5章为温媛媛,第6章为白琳,第7章为周治宇,第8章为周治宇、温媛媛,第9章为方海。

在本书的撰写过程中还得到多位同志的帮助和支持,其中有马文强、陈宇、陈惜泉、王宇、刘宁宁、黎红武、陈显舟、田华、赵俊艺、宋宝相、尚湘安等,在此一并表示感谢。本书在编写的过程中参阅了大量的中外资料和经典著作,均已列入参考文献中,在此谨向这些作者表示深切的感谢。本书的出版还要感谢中国空间技术研究院西安分院和神舟学院西安分院的大力支持。还要特别感谢上海交通大学出版社为本书出版所做的大量工作,正是由于出版社编辑们严格把关、耐心帮助和热情鼓励,才使得本书虽然有所延后但最终得以和读者见面。

书中存在的不妥之处,敬请广大读者予以批评指正。

符号表

$\mathbf{A}$ 混合矩阵

a_{ij} 混合矩阵 $\mathbf{A}$ 的第 ij 个元素

$\boldsymbol{\alpha}(\theta_i)$ 信号方向矢量

$\tilde{\mathbf{A}}$ 广义混合矩阵, $\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{V}\mathbf{A}$

$\hat{\mathbf{A}}$ 直接由 ICA 得到的阵列流形估计, 不准确

$\arg(\cdot)$ 取复数的相位

$\det(\cdot)$ 求矩阵的行列式

$\text{diag}(\cdot)$ 取矩阵的对角线元素组成矢量或构造以矢量为对角线元素的对角阵

$E[\cdot]$ 取集平均

$\text{est } \mathbf{A}$ 阵列流形较精确的估计

$\mathbf{G}$ 全局传输矩阵, $\mathbf{G} = \mathbf{W}\mathbf{A}$

$J(\mathbf{W})$ 目标函数

$\text{kurt}(\cdot)$ 计算信号矢量的峭度

m 传感器或接收信号个数

n 源信号个数

$\mathbf{P}$ 广义置换矩阵, 表示 ICA 的不确定性

$\mathbf{Q}$ 表示 ICA 不确定性的对角阵

$\mathbf{s}$ 独立的源信号或独立分量矢量

$\hat{\mathbf{s}}$ 欠定模型下估计的源信号矢量

$\text{sign}(\cdot)$ 取向量或矩阵元素的符号

$\mathbf{U}$ 分离矩阵的转置, $\mathbf{U} = \mathbf{W}^T$

$\mathbf{V}$ 白化矩阵

W 分离矩阵

x 接收的混合信号矢量, $x = As$

y 分离后的信号矢量, $y = Wx$

z 预处理后的信号矢量, $z = Vx$

Γ 幅相误差矩阵

λ 相关矩阵的特征值

Λ 对角阵

∇ 梯度算子

$\langle \cdot, \cdot \rangle$ 两个向量的内积

$(\cdot)^\dagger$ 矩阵的伪逆

$\hat{\theta}$ 参量 θ 的估计值

目 录

第 1 章 绪论 1

- 1.1 盲信号分离 / 1
- 1.2 盲信号分离技术发展历程和前景 / 3
- 参考文献 / 8

第 2 章 盲信号分离的数学基础 12

- 2.1 随机过程和概率分布 / 12
- 2.2 高阶累积量 / 16
- 2.3 概率密度函数的级数展开 / 18
- 2.4 估计理论 / 20
- 2.5 信息论基础 / 29
- 参考文献 / 31

第 3 章 盲信号分离基本理论 32

- 3.1 盲信号分离的数学模型 / 32
- 3.2 盲信号分离的基本假设 / 34
- 3.3 盲信号分离的不确定性 / 35
- 3.4 盲信号分离算法性能评价准则 / 36
- 3.5 盲信号分离的预处理技术 / 38

3.6 盲信号分离的基本方法 / 44

3.7 特殊情形下的盲分离 / 49

参考文献 / 51

第4章 线性瞬时混合盲信号分离

52

4.1 盲信号分离的快速算法 / 52

4.2 自适应盲分离算法 / 78

4.3 盲信号提取技术 / 91

参考文献 / 99

第5章 卷积混合盲信号分离

101

5.1 瞬时盲分离算法向卷积盲分离算法的时域推广 / 101

5.2 时域转化为常规 ICA 方法 / 102

5.3 线性预测的卷积盲分离算法 / 104

5.4 瞬时盲分离算法向卷积盲分离算法的频域推广 / 114

5.5 基于 Householder 变换的卷积盲分离频域算法 / 115

参考文献 / 133

第6章 欠定混合盲信号分离

136

6.1 欠定模型下的盲信号可提取性 / 136

6.2 欠定模型下的盲源分离技术 / 141

6.3 单通道盲源分离技术概述 / 151

参考文献 / 153

第7章 基于盲信号分离的阵列信号处理

156

7.1 阵列信号模型与盲信号分离模型 / 156

7.2 复数盲分离算法 / 157

7.3 盲信号分离不确定性对阵列流形估计的影响及校正 / 164

- 7.4 基于盲信号分离的 DOA 估计 / 171
- 7.5 基于盲信号分离的盲数字波束形成 / 185
- 7.6 基于盲信号分离的阵列幅相误差校正 / 196
- 参考文献 / 210

第 8 章 基于盲信号分离的共信道多干扰信号的自动识别 212

- 8.1 基于盲信号分离的信号和干扰自动识别 / 213
- 8.2 基于高阶累积量的调制方式及干扰信号自动识别 / 221
- 参考文献 / 230

第 9 章 盲分离在图像处理中的应用 233

- 9.1 盲分离在高光谱图像混合像元分解中的应用 / 233
- 9.2 盲分离在脑图像分析中的应用 / 242
- 参考文献 / 250

索引 253

第1章 绪 论

当代,信号处理技术已经深入渗透到科学和技术的各个领域,人们需要获取大量的信息就要运用先进的信号处理技术。需求推动着技术发展,信号处理技术的发展始终处在“进行时”。盲信号分离技术作为盲信号处理技术的一个分支,与盲均衡、盲解卷积等技术一样,随着“盲”的概念被认识、数字技术的迅猛发展以及各种新算法的涌现,不断得到应用和展现。可以这样认为,盲信号分离技术的理论基础已经是完备的,但在实际应用上还处在初始阶段,应用的面还不够广,具体的工程化问题还有待解决,这点在以下章节中可以体会。

1.1 盲信号分离

在源信号、系统传输矩阵和输出信号三个量中,任意已知两个量,很容易求得第三个量。但在盲信号处理中,只知道输出信号一个量,要求其余两个量,这在任何信号处理方法中都是十分困难的。盲信号处理是一种仅根据系统的输出信号,估计原始的发射信号和系统传输矩阵的技术。按照要达到的目的不同,可以分为盲辨识(blind identification, BI)^[1]和盲源分离(blind source separation, BSS)^[2~4]两大类。盲辨识的目的是求得传输通道的混合矩阵;盲源分离的目的是求得源信号的最佳估计。在信号处理领域中,盲源分离也常称为盲信号分离(blind signal separation, BSS),这时的“源”指原始信号。盲信号分离属于盲信号处理研究的范畴。在以后章节的叙述中,将盲信号分离与盲源分离不加区别地视为同一个概念使用。

BI 和 BSS 虽然应用领域以及研究的出发点都有很大的不同,但是它们面对的模型是类似的,因此在信号处理时采用了许多共通的思路。BSS 和 BI 在一定

条件下可以进行转化。例如,在完成 BSS 的任务后,则很容易利用已知的输出信号和估计的源信号这两个量,估计出传输通道的混合矩阵,即进行 BI 处理。相反,如果首先完成 BI 的任务后,也很容易估计源信号,即进行 BSS 处理。事实上,对很多 BSS 算法得到的分离矩阵直接求(伪)逆,就可以得到传输矩阵的估计了。因此,利用 BSS 不仅能得到源信号的估计,也可以得到传输矩阵的估计。

进行 BSS 有许多方法,但是目前应用最广、效果最好的是独立分量分析(independent component analysis, ICA)。在一定程度上,ICA 已经成为 BSS 的代名词。下面重点讨论这两者之间的区别和联系。

ICA 是为了解决盲源分离问题而逐渐发展起来的一种新技术。这时盲源分离中“源”指的是独立分量,也就是“鸡尾酒会”里面说话者的语音信号。ICA 利用源信号统计独立等容易满足的先验条件,能够从混合信号中重现不可观测的各个源信号分量。在源信号相互独立的假设条件下,ICA 与 BSS 具有相同或类似的模型,或者称为两种平行的方法,而使用相同或类似的算法来求解,因此许多文献经常将 BSS 与 ICA 不加区分地使用,通常情况下这种混用影响不大。

然而 ICA 与 BSS 也有一些不同之处。BSS 是从应用角度定义的一类具体问题,目标是估计原始源信号,即便它们不完全相互统计独立;而 ICA 更多的是从理论或数学角度出发,得到的一种信号分析技术,目标是确定出某种变换,以保证输出信号各分量尽可能的相互独立。许多情况下,ICA 使用了高阶统计量,因此 ICA 方法是处理非高斯信号的一种有效手段,也可看作是主成分分析(principal component analysis, PCA)方法的推广。然而实现 BSS 的方法并不仅仅局限于 ICA,当源信号具有一些额外的特征时,也可以利用这些特征来分离源信号,如信号的时间相关特性、信号的非平稳特性等。目前,对 BSS 的数学描述采用的大都是 ICA 模型,因此 BSS 和 ICA 是可以互换的。除了在这里专门讨论以外,在后面对 BSS 和 ICA 也不加区分地进行使用。

盲信号分离可以按照不同的标准进行分类。按照模型的不同,BSS 可以分为针对线性瞬时模型的分离算法、针对卷积线性模型的分离算法以及针对非线性模型的算法。按照数据来源的不同,BSS 可以分为批处理和自适应处理两种算法。批处理是根据一批已经取得的数据进行处理,自适应处理是随着数据的不断输入作递归式处理。根据源信号和传输矩阵取值范围的不同,BSS 可分为实数 BSS 算法和复数 BSS 算法。按照源信号与传感器个数的不同,BSS 可分为源信号个数大于传感器个数的欠定盲分离、源信号个数等于传感器个数的正定

盲分离、源信号个数小于传感器个数的超定盲分离。当然对盲信号分离的分类方法还很多,这里不再一一列举。

1.2 盲信号分离技术发展历程和前景

盲信号分离经过近三十多年的发展,已经成为信号处理学界的关注热点,取得了不少理论成果和应用实例。

1.2.1 研究发展历程

盲信号处理技术的起源可以追溯到 20 世纪 80 年代,当时为了解决数字通信线性单输入单输出(single input single output, SISO)统计信道的补偿问题,而需要设计一种自适应均衡器,此时的通道特性和输入信号都是未知的。实际上此类场景后来归结为盲均衡技术所要处理的问题。盲信号分离与盲均衡问题不同,它所要处理的问题是针对未知的多输入多输出系统(multiple-input multiple-output, MIMO),起初系统限制为无记忆的,后来发展的 MIMO 为线性或非线性混合、记忆或无记忆信道。但是,在 1982 年前后盲信号处理问题的提出却与通信技术毫无关系,是在研究脊椎动物运动时,对照中枢神经系统分解出不同的运动信息,构建神经系统模型的架构而提出的。因此早期的盲分离技术的研究多采用神经网络进行。

盲分离的真正进展是在 20 世纪 80 年代中期,先驱性的工作主要由 Jutten 和 Herault^[5]完成。他们提出了盲源分离中的 H-J 学习算法,完成两个混叠源信号的分离。后来还有人设计出专用的 CMOS 芯片来实现其算法^[6,7]。1991 年,Jutten、Herault、Comon、Sorouchyari^[8-10]等在 *Signal Processing* 上发表了关于盲源分离的三篇经典文章,标志着盲分离问题研究的重大进展。在 H-J 算法基础上,Jutten 和 Herault 类比主分量分析方法,第一次提出了独立分量分析的新概念。值得指出的是,在整个 80 年代到 90 年代初,对 BSS 的研究主要集中于法国的学者,但其国际影响有限,当时学界的兴趣主要集中在神经网络领域。

1994 年 Comon 系统地分析了瞬时盲信号分离问题^[11],给出了 ICA 严格的数学定义,并证明了只要恢复出混合信号中各个信号之间的相互独立性就可以完成对源信号的分离。可以说,Comon 的工作实际上使得对盲信号分离算法的

研究,变成了对独立分量分析的代价函数以及其优化算法的研究,使得以后的算法设计开始有了明确的理论依据,大大推动了盲信号分离技术的进一步发展。

在 ICA 理论的基础上,涌现了一大批优秀的盲分离算法。Gaeta 和 Lacoume 于 20 世纪 90 年代初提出了最大似然估计算法,后来 Cardoso 等又进行了改进。同期,Oja 等提出并发展了非线性 PCA 算法^[12]。Bell 和 Sejnowski^[13]于 1995 年提出了信息最大化算法,成功地从 20 路随机混合声音信号中分离出源声音信号,引起了广泛的关注和应用。为了克服信息最大化算法只能分离超高斯信号的缺点,1999 年,Lee、Girolami 和 Sejnowski 又提出了扩展的信息最大化算法^[14]。Amari 等于 1996 年在信息最大化算法的基础上,提出了自然梯度算法,并指出了信息最大化算法与最大似然算法之间的联系^[15]。Cardoso 也于同年提出了与自然梯度类似的相对梯度优化算法^[16]。自然梯度和相对梯度优化算法能够避免矩阵求逆运算,降低了 ICA 算法运算量,提高了算法的稳定性。Hyvarinen 和 Oja 于 1997 年提出了盲分离中基于非高斯性最大的定点算法,即 FastICA 算法^[17],后来还对算法进一步完善^[18]。由于算法具有收敛速度快、鲁棒性强、分离精度高等特点,因此继信息最大化算法后,FastICA 算法引起了一次新的理论研究与应用的高潮。Cardoso 等利用高阶统计量的方法,提出了一种有名的代数盲分离方法,即特征矩阵联合近似对角化方法^[19]。

在盲信号分离算法不断提出的同时,盲处理算法的收敛特性也得到了系统的研究。早期的研究都是针对最简单的两个源信号混合的情况进行的。1991 年,Sorouchyari^[20]和 Comon 等^[8]分别使用不同的方法分析 H-J 算法的收敛性和稳定性,Deville 将 Sorouchyari 和 Comon 的结果联系起来,解决了 H-J 算法在只存在两个源信号和两个混合信号的最简单情况下的收敛性问题^[21,22]。Tong 等于 1991 年对盲分离问题的可辨识性进行了初步研究^[23],直到 1996 年曹希仁才彻底解决了盲分离的可解性条件^[24]。

随着基本盲分离理论的逐渐开展,越来越多的学者投入到扩展的盲分离问题的研究中,促进了含噪盲分离、欠定盲分离及非线性盲分离等的发展。噪声环境下的盲分离主要有两种思路,一种是先通过滤波等预处理去除噪声,然后使用基本 ICA 方法完成信号分离;另一种思路是将去噪与信号分离同时考虑,主要使用六阶累积量^[25]及高斯矩^[26]等方法。对于观测信号个数少于源信号个数的欠定盲分离,主要有 Lewicki 等提出的贝叶斯方法^[27]和 Bofill 等提出的两阶段(即先估计混合矩阵,然后估计源信号)的分离方法^[28]。针对非线性混合的盲分离,主要研究其解的存在性和唯一性分析^[29],采用的方法主要有基于自组织

映射的算法^[30]、贝叶斯集合学习法^[31]和遗传算法^[32]等。

国内对盲信号处理的研究起步相对较晚,大约在20世纪90年代中期才开始开展关于盲信号处理理论的研究。清华大学的张贤达教授在其1996年出版的《时间序列分析——高阶统计量方法》一书中,介绍了有关盲分离的理论基础。1999年,张贤达和保铮综述了盲源分离的理论、方法以及应用,对盲信号分离在国内的发展有积极推动作用^[33]。后来张贤达等还提出了分阶段学习的盲分离算法^[34]。

上海交通大学胡光锐、虞晓等研究了盲信号处理在语音分离与识别领域的应用^[35]。在无线通信领域,东南大学的何振亚等提出了一系列新的基于高阶统计量与信息熵的判据与分离算法^[36]。凌燮亭利用反馈神经网络 Hebbian 学习算法,实现近场情况下一般信号的盲分离^[37]。刘琚从信息理论出发提出了基于递归神经网络的盲分离^[38],谭丽丽和韦岗提出了卷积混叠信号的盲分离算法^[39]。

此外,西北工业大学的倪晋平等^[40]、华东理工大学的林家骏等^[41]、上海交通大学吴军彪等^[42]、西安电子科技大学的冯大政等^[43]都对盲分离问题进行了研究,取得了不少研究成果。国内许多研究所也都开始了这方面的研究,例如电子54所^[44]、36所以及29所等,并且也取得一定的研究结果。

随着盲信号分离技术不断发展,这方面的专著也不断涌现,进一步促进了这一领域的持续发展。*Proceedings of IEEE* 1998年10月的论文集为盲信号处理专辑^[31,32],该专辑对这一领域的成果作了综述并指出进一步的发展方向。此后,Haykin^[1,2]、Hyvarinen^[3]、Cichocki^[4]等相继出版了盲信号分离方面的专著。国内本领域的专著越来越多,反映了相关领域的活跃程度。除了吴正国^[45]、周宗潭^[46]等分别翻译了国外两本盲信号分离方面的经典专著外,杨福生^[47]、马建仓^[48]、史习智^[49]、李舜酩^[50]、张天骐^[51]、陈小虎^[52]、郭一娜^[53]、王尔馥^[54]、陈宏滨^[55]、郑辉^[56]、孙守宇^[57]、胡祥云^[58]、刘琚^[59]、高勇^[60]等也相继出版了盲信号分离方面的专著,对国内盲信号分离的研究起了积极推动作用。

1.2.2 研究前景

盲信号分离技术的发展前景可分为两方面讨论,一是尚有若干有待解决的问题,如欠定问题、非线性混合问题、非平稳问题和源信号中含噪声问题等;二是有关应用问题,盲信号分离技术发展至今只有不到20年的时间,由于它的应用范围很广,所以这个课题一直受到神经网络学界、信号处理学界以及生物医电学

界等的重视。

欠定问题关系到实际应用,一般的盲信号分离建立在假设源信号相对独立,要求传感器的数目不少于源信号的数目。但实际情况是源信号的数目是未知的,传感器的数目往往尽可能要求少一些,于是通常的盲分离算法会失效。解决这样的问题无论从理论和应用上都有很大的意义。

非线性混合同样在实际应用中是普遍的情况,基于理想的线性混合的一些算法一般都会失效。目前对于非线性混合盲信号分离还没有一种普遍的方法可以解决。也有提出降低盲的程度的方法,还有提出一种称为后非线性混合的方法,即用非线性加在线性混合上代替一般的非线性混合,得到的多解性与线性的BSS相同。所以,不同的具体问题建立的非线性模型不相同,提出的算法也不相同。在这一方面还有很多待开拓的课题。

非平稳问题表示源信号的混合不是平稳的过程,在这种情况下混合矩阵是随时间变化的。分离矩阵也不应该是不变的,同样是时变的。因此矩阵相应的元素是时间的变量。分离时需要考虑的不仅仅是源信号的独立性,还考虑它们的时间相关性。采用新的时间结构,利用自协方差进行分离,在寻找分离矩阵时由一步时延扩展到多步时延的方法。还有采取利用方差的平稳性实现分离的方法。近来用隐状态模型描述非平稳混合,再通过粒子滤波器建立状态密度模型完成源信号分离。相位自适应有限长单位冲激响应(finite impulse response, FIR)滤波器也是一种有效的方法。

在研究盲源分离时,通常考虑源信号与所加的噪声是统计独立的。分离模型中包含有噪声项时,混合矩阵的估计就变得非常困难。运用新的含噪模型,再用常规的算法,对于噪声成分数目比较少的情况还能适用。实际处理中在运用算法之前进行降噪处理是非常有效的。另外,还有降噪处理中确定一个参考噪声源,将盲分离的无监督学习过程与降噪监督的学习过程同时进行,以非线性自适应处理完成消噪过程。这种形式也可以归结为预处理。

以上所提到的有待解决的问题,在后面各章节中有的会展开一定的讨论。

有关盲源分离的应用方面情况,在最近几年的国际声学、语音和信号处理大会(IEEE Int Conf Acoust, Speech, Signal Processing, ICASSP)上,每次都有关于盲源分离的专题,尤其是在医学信号分析与处理、地球物理数据处理、数据挖掘、语音增强、图像识别以及无线通信领域方面。在这些实际应用中,存在大量可以利用的信号或者数据,通过对这些数据的处理,可以得到多方面的好处。

下面列举盲信号分离在通信、数字水印、图像处理、语音、生物医学等领域的