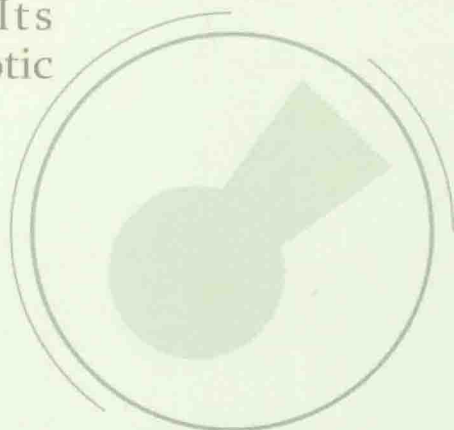


盲源分离及其 在混沌信号处理中的应用

Theory of Blind Source
Separation and Its
Application in Chaotic
Signal Processing

■ 王尔馥 著

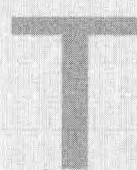


人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



信息与通信创新学术专著
· 通信加密技术与系统 ·

盲源分离及其 在混沌信号处理中的应用



Theory of Blind Source
Separation and Its
Application in Chaotic
Signal Processing

■ 王尔馥 著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

盲源分离及其在混沌信号处理中的应用 / 王尔馥著

— 北京 : 人民邮电出版社, 2015. 4

(信息与通信创新学术专著. 通信加密技术与系统)

ISBN 978-7-115-37294-9

I. ①盲… II. ①王… III. ①信号盲分离 IV.
①TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第244190号

内 容 提 要

盲源分离是基于独立分量分析所构建的一类信号处理方法。国内外关于盲源分离技术的理论书籍均侧重于算法, 而其应用研究和所能给出的实例大多集中在语音信号处理方面。鉴于盲源分离理论在诸多领域中具有广泛的应用前景, 本书集合了近年来的研究成果, 侧重于结合多种变换域中的信号处理方法, 将其与独立分量分析融合, 并给出在无线多径系统以及保密通信领域中的典型应用, 供该领域相关研究人员参考。

-
- ◆ 著 王尔馥
责任编辑 代晓丽
责任印制 彭志环
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
固安县铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 700×1000 1/16
印张: 13 2015 年 4 月第 1 版
字数: 254 千字 2015 年 4 月河北第 1 次印刷
-

定价: 65.00 元

读者服务热线: (010)81055488 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

前言

消息是物质或者精神状态的一种反应，举例来说，语音、文字、图片、影像等都是消息，而消息中为人们所关心的、有用的部分才称为信息。换言之，消息是外在表现形式，是外延；信息是内在呈现内容，是内涵。信息由信号来承载，信号处理理论中所研究的信号在这里特指电信号。如我们随时可听到的语音信号，随时可看到的视频图像信号，伴随着我们生命始终的心电信号，脑电信号以及心音、脉搏、血压、呼吸等众多的生理信号。

信号是变化着的，此处所说的“变化”，一是指信号的幅度随时间变化，二是指信号的频率随时间变化。傅里叶变换是沟通时域与频域之间的一座桥梁。但是，人们在应用傅里叶变换的过程中很早就发现了傅里叶变换的不足，这些不足主要体现在如下几个方面。

第一，傅里叶变换不具有时间和频率的“定位”功能。

第二，傅里叶变换对于非平稳信号存在局限性。

第三，傅里叶变换在分辨率上存在局限性。

克服傅里叶变换局限性的方法有很多，如短时傅里叶变换、Gabor 展开、Wigner-Ville 时-频分布、Cohen 分布以及后续出现的小波变换、多分辨分析等，这些方法可以归纳为时频分析方法。时频分析也就是从时域与频域两个角度同时对一个信号进行分解，以期发现其频谱成分随时间变化的情况。从变换域的角度看，时频分析是两个域之间的联合分析。进一步地，若融合旋转频率（分数傅里叶变换）、瞬时频率域（经验模态分解）将有可能得到信号更多的性质，即多域联合分析技术。

从时域、频域到多域联合分析，始终是对信号的确定性进行分析，而独立分量分析（Independent Component Analysis, ICA）则是基于信号统计特性的一门技术。基本的 ICA 是指从多个源信号的线性混合信号中分离出源信号的技术，除了已知源信号是统计独立外，无其他先验知识，ICA 是伴随着盲信源问题而发展起来的，故又称盲分离。ICA 方法是基于信源之间的相互统计独立性，与传统的滤

波方法和累加平均方法相比,ICA 在消除噪声的同时,对其他信号的细节几乎没有破坏,且去噪性能往往比传统的滤波方法好很多。而且,与基于特征分析,如奇异值分解 (Singular Value Decomposition, SVD)、主分量分析 (Principal Component Analysis, PCA) 等传统信号分离方法相比,ICA 是基于高阶统计特性的分析方法。在很多应用中,对高阶统计特性的分析更符合实际。独立分量分析在通信、阵列信号处理、生物医学信号处理、语音信号处理、信号分析及过程控制的信号去除噪声和特征提取等领域有着广泛的应用,还可以用于数据挖掘。

然而,在很多情况下,对于必要的信息却是未知的。将待认知的对象抽象为源信号,当源信号全部或部分已知时,根据已知信号通过适当的变换就可以将源信号还原出来。然而,在源信号和传输信道信息均缺失的情况下,仅依据有限的观测信号来分离、恢复源信号的过程,称为盲源分离。

自从 Herault 和 Jutten 提出用神经网络的方法实现语音信号盲源分离,在该领域做出开创性工作以来,关于盲源分离理论的研究层出不穷,并取得了丰硕的成果。盲源分离先后在语音识别、图像处理、地震勘探以及生物医学等领域获得了成功的应用,引起了信号处理学界和神经网络学界的共同关注。不过,随着应用化进程的不断推进,盲源分离算法所存在的问题也不断显现。对盲源分离算法进行深入研究并根据应用背景的需要提出改善性能的实用化技术,对进一步拓宽盲源分离的应用领域具有重要意义。本书围绕这一热点课题展开,并将研究重点放在卷积混合模型以及增强抗噪声稳健性和降低接收设备开销的实用化的盲源分离技术上。

本书在对瞬时混合模型进行分析的基础上,研究卷积混合模型及实用化盲源分离技术。盲源分离问题需要满足基本的假设条件,其中独立性假设是核心所在,基于此建立起来的独立分量分析理论在用来分离独立源信号时与盲源分离是等价的。相似系数和性能指数是两个常用的评价算法分离性能的指标,分别从分离信号和分离矩阵的角度进行定义。

盲源分离问题由分离准则和优化算法两部分构成,分离准则主要有基于信息论、基于最大信噪比和基于高阶累积量三类。本书采用自然梯度优化算法,分别对三类准则下的瞬时混合盲源分离算法进行仿真,结果表明高阶累积量准则对高斯噪声具有不敏感性,更适用于无线通信系统。当与加权协方差矩阵的特征值接近时,基于高阶累积量的算法容易陷入局部极值而无法正确分离所有信号,基于归一化峭度的顺序盲源提取算法可以从混合信号中提取出具有特定属性的信号。

线性卷积混合模型经过 Fourier 变换可以转化为频域的线性瞬时混合模型,因此解卷积至少可以有时域和频域两类方法。时域分离算法卷积计算量大、方法复杂,收敛性能也一般;频域分离算法可以利用 FFT 快速运算,但是需要解决各个频点上分离信号排序不一致的问题。频域分离模型体现了噪声消除与信号分离之间的矛盾,本书通过对无噪声情形下混合矩阵结构的分析,找到分离信号排序不一致的

根源并提出两项解决方案。定义邻频幅角比参数来寻找差错频点位置,纠正相应位置上的分离信号到一个相同的顺序上,解决了频域算法的排列顺序不一致这个瓶颈问题。自适应耦合法引入耦合因子来保持相邻频点上分离矩阵的相关性,无需单独的排序过程,降低了出现顺序混淆的概率。仿真表明其效果虽然没有邻频幅角比好,但避免了额外的运算量开销,可以在精度要求稍低的场合使用。

总体上来说,盲源分离算法尚处于理论研究阶段,推广到实际系统时存在着一些制约算法性能的因素。一方面,接收设备处存在加性高斯白噪声,无论是高阶累积量还是子空间理论,都只具备十分有限的噪声抑制能力。本书提出采用时频分析作为噪声预处理的手段,首先提高观测信号的信噪比,继而再进行盲源分离。分别设计了分阶段噪声预处理方案和时频联合两步消除噪声预处理方案,充分发挥了经验模态分解收敛速度快和小波变换消除噪声性能稳定的优势,两步化的预处理方案可以使观测信号的信噪比降低到一个较为理想的程度,提高了算法整体的抗噪声性能。另一方面,实际应用中多数情况下系统是一个黑匣子,无法根据源信号的数目来设计接收阵列的规模,即使已知源信号数目,当数目太大时接收阵元的规模也将同比增加,从而带来昂贵的设备开销。为简化接收设备的复杂度,有必要研究接收阵列低元化的盲源分离技术。本书在稀疏成分分析的基础上,着重于聚类环节的实现,提出一种将 K-mean 聚类和 Kohonen 神经网络聚类相结合的 K-Kohonen 混合聚类算法,不仅加快了 Kohonen 网络的收敛速度,而且可以获得精确的聚类结果。结合主分量分析,提出了基于混合聚类算法的 K-K-P 欠定混合盲源分离算法,能够比较准确地估计信道混合矩阵,从而实现阵列低元化下的盲源分离。在算法实用化和降低设备开销方面给出了重要的研究成果。

盲源分离在很多领域都获得了成功的应用,但应用于通信系统的盲源分离算法的性能却被一些实际因素所制约。作为应用性探讨,本书对卷积混合模型进行简化,在莱斯衰落信道下讨论了多径数、莱斯因子和最大传输时延 3 个参数对分离性能的影响,并通过仿真实验给出了数值结论。随着社会的不断进步,计算机的普遍应用和各种通信网络的建立,人们逐步走进一个信息爆炸的时代,对信息保密度的要求越来越高,因此保密通信领域应运而生。混沌信号凭借其随机性、对初始条件的敏感性以及宽谱功率谱密度等优质特性,使混沌信号很难被破解,被广泛应用到保密通信中。本书将盲源分离应用于混沌保密通信系统之中,融合多域联合分析方法,对混沌信号的时频域特性进行分析,深入挖潜其能量分布,找到区分于其他信号的特性,进而可以进行混沌背景下谐波信号的有效提取。本书所研究的在混沌背景下提取谐波信号,不仅可以作为混沌保密通信系统的保密性检验手段,且对于分析、侦查对方信号,提高混沌保密通信系统的自身安全性也具有重要意义。

作者

2014 年 10 月

目 录

上篇 独立分量分析及盲源分离技术研究

第 1 章 盲源分离技术及其研究现状	3
1.1 盲源分离技术的发展历程	3
1.2 线性瞬时混合盲源分离	5
1.3 线性卷积混合盲源分离	7
1.4 非线性混合盲源分离	9
1.5 本章小结	10
第 2 章 盲源分离的基本理论与算法	11
2.1 数学模型	11
2.1.1 线性瞬时混合模型	11
2.1.2 线性卷积混合模型	13
2.1.3 非线性混合模型	15
2.1.4 模型讨论	15
2.2 可分性理论	16
2.2.1 假设条件	16

2.2.2	盲可提取的充要条件	17
2.2.3	盲可提取的信源个数	19
2.3	性能指标	20
2.3.1	相似系数	20
2.3.2	性能指数	21
2.3.3	不确定性与等变化性	22
2.4	独立分量分析	23
2.4.1	信息论准则	23
2.4.2	最大信噪比准则	25
2.5	仿真实验与性能分析	26
2.6	本章小结	30
第 3 章	卷积混合盲源分离的频域算法	31
3.1	分离模型	31
3.1.1	前馈分离模型	31
3.1.2	反馈分离模型	34
3.2	卷积混合盲源分离算法分类	35
3.3	频域分离算法	36
3.3.1	DFT 与 STFT	36
3.3.2	顺序不一致问题	37
3.3.3	现有方案及存在的问题	38
3.4	邻频幅角比排序法	39
3.4.1	混合矩阵的结构	39

3.4.2 邻频幅角比	40
3.4.3 算法流程	41
3.4.4 仿真实验与分析	42
3.5 自适应耦合法	45
3.5.1 算法原理	46
3.5.2 仿真实验与分析	46
3.6 本章小结	48
第 4 章 欠定混合盲源分离技术	50
4.1 稀疏成分分析	50
4.1.1 0-范数解与 1-范数解	51
4.1.2 K-mean 聚类	53
4.1.3 Kohonen 网络聚类算法	54
4.2 K-Kohonen 混合聚类算法	56
4.2.1 最优解的吸引域	56
4.2.2 算法原理	57
4.3 K-K-P 欠定混合盲源分离算法	57
4.3.1 主分量分析	58
4.3.2 算法流程	60
4.3.3 仿真实验与分析	61
4.4 本章小结	64

中篇 时频分析及联合抗噪盲源分离技术研究

第 5 章 时频分析之小波变换	67
5.1 小波变换的发展历程	67
5.2 小波变换的定义及特点	68
5.3 小波变换的性质	71
5.4 小波的分类	73
5.4.1 经典类小波	73
5.4.2 正交小波	76
5.5 小波包变换	79
5.6 本章小结	80
第 6 章 时频分析之经验模态分解	81
6.1 EMD 方法的基本概念	81
6.1.1 瞬时频率	82
6.1.2 固有模态分量	82
6.1.3 三次样条插值函数	82
6.2 EMD 方法的步骤	83
6.3 边界效应的产生	85
6.4 边界效应的消除方法	85
6.4.1 镜像法及改进型镜像法	86
6.4.2 镜像闭合延拓法	86
6.4.3 基于多项式拟合法的边界效应处理法	87

6.4.4 基于 BP 神经网络的边界效应处理法	88
6.5 仿真实验与分析	88
6.6 本章小结	93
第 7 章 噪声环境下的盲源分离技术	94
7.1 噪声对算法性能的影响	94
7.2 时频分析消除噪声方法	96
7.2.1 小波消除噪声	96
7.2.2 EMD 消除噪声	98
7.3 单步分阶段噪声预处理方案	100
7.3.1 算法方案设计	101
7.3.2 仿真实验与分析	101
7.4 时频联合两步消除噪声预处理方案	104
7.4.1 算法方案设计	104
7.4.2 与其他算法的比较	104
7.4.3 仿真实验与分析	105
7.5 本章小结	108

下篇 多域联合盲提取算法及其应用研究

第 8 章 多径信道下的谐波信号盲提取算法研究	111
8.1 高阶累积量	111
8.2 峭度	112
8.3 窄带无时延系统	113

8.3.1	Cardoso 经典高阶累积量算法	113
8.3.2	Cichocki 顺序盲源提取算法	117
8.3.3	噪声去偏置盲源提取算法	119
8.4	宽带时延系统	122
8.4.1	莱斯衰落信道下的简化模型	122
8.4.2	多径对分离性能的影响	125
8.5	本章小结	129
第 9 章 混沌理论及典型混沌信号的时频分析		130
9.1	混沌理论基础	130
9.1.1	混沌的定义	130
9.1.2	混沌的基本特征	131
9.1.3	混沌的李雅普诺夫指数	132
9.2	典型混沌系统	133
9.2.1	一维混沌系统	133
9.2.2	二维混沌系统	134
9.2.3	三维混沌系统	136
9.3	典型混沌系统的频域分析	138
9.4	本章小结	140
第 10 章 盲源分离在典型混沌系统中的普适性分析		141
10.1	混沌混合系统的简化模型	141
10.2	固定点算法及仿真分析	141
10.3	联合近似对角化法及仿真分析	153

10.4 本章小结	163
第 11 章 基于混沌系统稳态点捕捉的盲源分离算法	164
11.1 混沌系统能量聚集带的判定	164
11.2 混沌系统能量聚集带对信号提取的影响	165
11.3 基于混沌系统稳态点捕捉的盲源分离算法	167
11.4 仿真实验及性能分析	169
11.5 本章小结	180
参考文献	181
名词索引	192

独立分量分析及盲源分离技术研究

由于独立分量分析 (Independent Component Analysis, ICA) 很早便被用于盲源分离 (Blind Source Separation, BSS) 当中, 因此很多场合经常将二者等同于同一个问题。事实上 ICA 和 BSS 并不完全等价, 其假设和目的都不尽相同。

ICA 在源信号统计独立的假设条件下, 确定一个逆变换保证输出信号的各分量尽可能地相互独立; BSS 则无论源信号是否具备统计独立性, 其目的都是设法分离与重构源信号。应该说 ICA 是实现 BSS 的众多方法中的一个子类, 由于源信号通常是由不同的物理设备发出的, 统计独立性很容易满足, 因此常用 ICA 代替 BSS。具体地说, ICA 以非高斯源信号为研究对象, 要求混合信源中至多含有一个高斯分布信号。这是由于多个高斯分布信号的线性混合仍然服从高斯分布, 从而在独立性的意义上不再可分。ICA 包括两个方面——建立目标函数和选择寻优算法, Comon 首提的对比函数是目标函数的一种, 选择不同的对比函数将得到不同的算法。对比函数可以分为两类, 基于信息论和基于统计理论, 而标准梯度、自然梯度和随机梯度则属于寻优算法, 自然梯度是最基本、最常用的学习算法。

本篇构建在独立分量分析的基础上, 研究重点是盲源分离基本理论及与实用化紧密相关的若干项改进算法。主要包括以下几方面内容。

第 1 章简述盲源分离技术的产生, 第 2 章对盲源分离算法的基本理论和基本算法进行探讨。按照数学模型对算法进行了分类, 着重指出瞬时混合模型与卷积混合模型之间的关系, 以便引出后续算法; 给出了盲源分离算法的基本假设条件并对算法的可分性理论进行探讨, 为了便于分析, 定义了常用的两个衡量算法性能的指标, 以此作为性能评价标准, 对信息论准则和最大信噪比准则下的分离算法性能进行了仿真比较。

第 3 章着眼于卷积混合盲源分离的频域实现算法。在分析时域算法、频域算法和子空间算法各自的优缺点之后, 确定使用频域算法进行卷积混合盲源分离。通过对相邻频点上分离矩阵内部结构的分析, 设计了两种排序算法, 分别为邻频

幅角比算法和自适应耦合法。前者用单独的排序过程纠正所有发生错排序点的分离矩阵结构,后者通过耦合算子保证相邻频点上分离矩阵在迭代过程中的相关性。仿真实验证明二者可以得到很好的排序性能。

考虑到实际环境中,接收天线数通常较少,因此,第4章针对用尽量少的接收阵元分离尽量多的源信号这一需求,在源信号可以稀疏表示的前提下,提出了一种 K-Kohonen 混合聚类算法,用以实现对混合矩阵的估计,得到了比 K-mean 聚类更高的精度和效率。

第 1 章

盲源分离技术及其研究现状

盲源分离是指在源信号和传输信道的先验信息均未知的情况下，根据发送端源信号的统计特性，由观测到的混合信号来恢复或分离出源信号的信号处理技术。在以下情况中具有明显的优势：

- (1) 源信号不可观测；
- (2) 源信号的混合方式未知；
- (3) 收发端之间的传输信道难以建立数学模型或关于传输信道的先验知识无法获得。

盲源分离算法的显著特点是“盲”，特别适宜于复杂电磁环境下的信号分离。

1.1 盲源分离技术的发展历程

1991 年，Herault 和 Jutten 提出了一种神经网络方法，首次用盲源分离成功地实现了两个语音信号的分离问题。在此后的 20 多年时间里，盲源分离的理论研究工作取得了丰硕的成果，并已在语音识别、图像处理、地震勘探以及生物医学等领域得到了成功的应用。

1. 语音识别与回响消除

语音识别技术在很多领域都有广泛的应用。在真实的房间环境里，麦克风所捕捉到的信号可以看作是原始语音信号和房间冲激响应的卷积。房间冲激响应表征了声源和传感器之间的传递函数，可以用一个高阶 FIR 滤波器来近似。另外，当原始语音信号被周围环境的声学效应所干扰时还必须进行回响消除。显而易见，麦克风所使用的放大器不同、听筒所在的位置不同以及发声区域的变化都会导致房间的冲激响应发生改变。同时，受建筑物几何形状、建筑材料等因素的影响，干扰效应也是未知和时变的。因此在进行语音识别和回响消除时，需要用到盲源分离技术。

2. 图像重建与图像恢复

盲源分离在对天文、遥感和医学图像的重建与恢复中也有着成功的应用。实际过程中,能够引起图像模糊的原因很多,例如,曝光过程中相机的移动、透镜聚焦的不精确等。通常将原始图像作为系统的输入,而将原始图像的模糊版本作为该系统的输出,并将该模糊系统的传输函数建模为一个点扩展函数。在很多特定情况下,我们对于原始图像和模糊系统的点扩展函数的信息都是完全未知的,为了从已污染的模糊图像中恢复出原始的清晰图像,需要借助盲源分离技术来进行提取。

3. 地震信号处理

地质勘探需要在土壤中进行炸药爆破,用地音探听器来接收反射或衍射信号,再利用这些信号来估计反射函数。这些函数与不同地层的冲激响应有关,可以用来区分它们的地理特性。接收信号是由不同地层的短时冲激响应共同作用得到的,因为冲激响应和原始信号均未知,所以也要用到盲源分离。

4. 生物医学

胎儿心电图是反映胎儿心脏生理活动的一项客观指标。一般母体心电信号比胎儿心电信号大10~20倍,而且胎儿心电信号有10%~30%与母体心电信号混合。在将胎儿心电信号与母体心电信号视为独立信号源的前提下,盲源分离可以解决在母体心电强干扰条件下胎儿心电信号的提取问题。此外,脑电信号的测量不可避免地会受到心电信号的干扰,给医生的诊断带来很大困难,在这两方面,盲源分离都是良好的解决方案。

盲源分离在上述领域所获得的成功应用很快便得到了其他领域学者的一致认可,越来越多的学者开始将盲源分离算法引入到各自的研究领域中。

在通信系统,特别是宽带通信系统中,盲源分离同样具有很高的应用价值。无线信道固有的多径时延不可避免地会造成严重的码间干扰,无线衰落信道的损伤和频谱资源的稀缺是移动通信物理层面临的两大挑战。更重要的是,通信系统的信道传输模型与盲源分离的数学模型相似,其窄带和宽带通信系统的传输模型分别与线性瞬时混合和线性卷积混合盲源分离模型相对应。Fourier变换和卷积定理为两种模型搭起了桥梁,线性卷积混合模型可以转换为频域中的线性瞬时混合模型。本文尝试将盲源分离引入到通信系统中,解决信号与干扰的分离问题。

如同盲源分离最初应用于语音识别、图像处理、地震勘探以及生物医学等领域所面临的问题一样,算法完善和技术发展始终是其走向应用的重要前提。本节对现阶段盲源分离算法所存在的具有代表性的技术问题进行深入研究,并提出一些有效的解决方案。

按照混合方式的不同,可以将盲源分离算法分为线性瞬时混合和线性卷积混合两类。基于信息论的方法需要已知期望信号与干扰信号的概率密度分布特性,