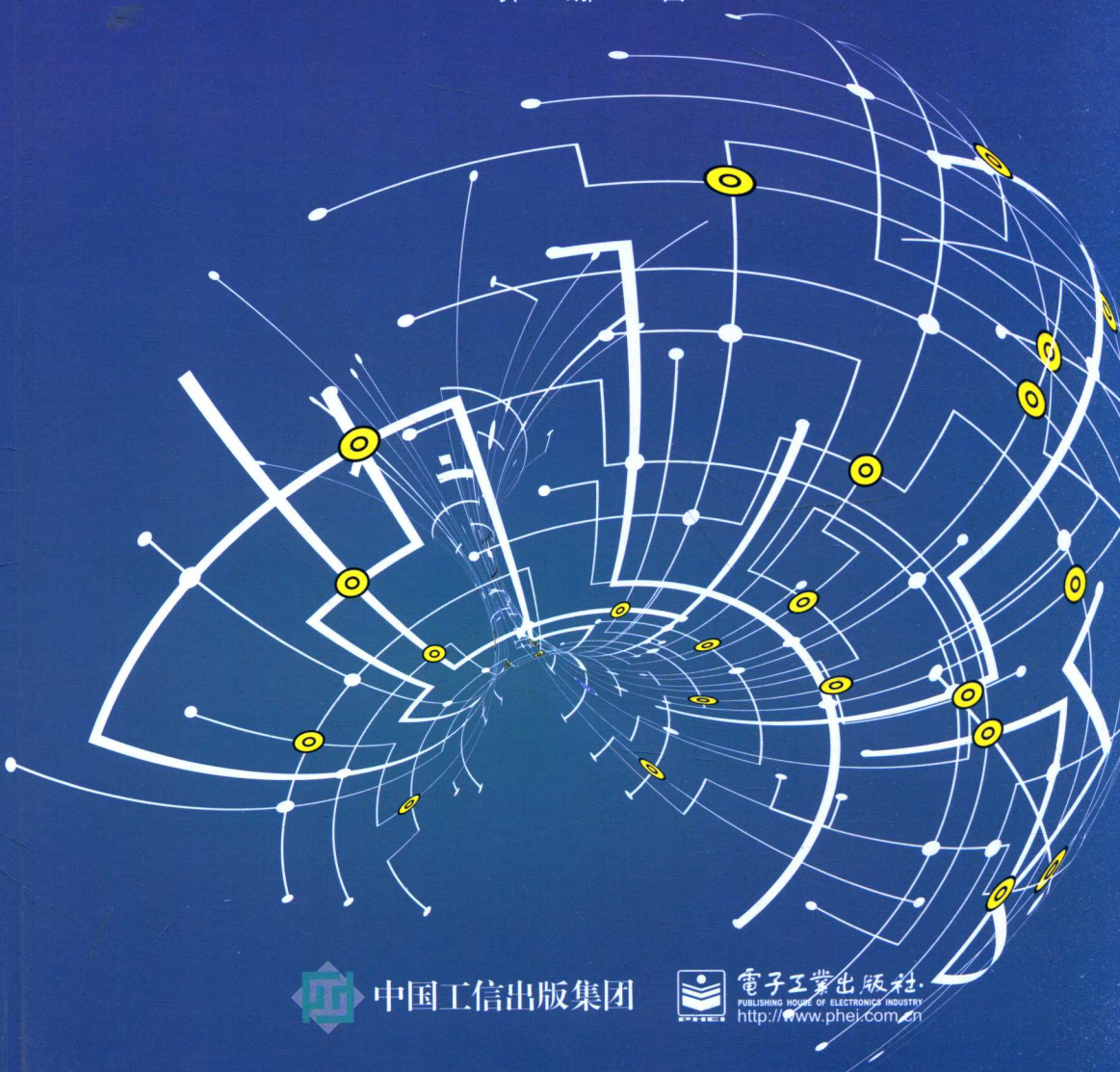


单通道线性混合信号 盲源分离算法研究

郭一娜 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

单通道线性混合信号 盲源分离算法研究

郭一娜 著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

盲源分离是生物医学、海洋环境、声学监测和军事侦察领域中的研究热点。传统的盲源分离法要求观测信号的数目不少于源信号数目,而在实际应用中受造价和安装条件等因素限制,常使观测信号的数目远少于源信号数目,从而传统盲源分离法很难恢复出源信号。因此,如何凭借单通道混合信号恢复出多通道源信号是数学领域中的一个具有挑战性的课题。

本书系统地介绍了单通道盲源分离理论、单通道混合信号的模型建立、单通道盲源分离算法的实现。首先,依据各种信号的统计特性、时频域特性和非线性特性,将多路源信号线性混合为单路信号并对其分类建模;随后提出一系列时频域相结合的单通道盲源分离算法;最后,针对已知的单通道混合信号模型及参数自适应分离并恢复多路源信号。这些算法可提高源信号复原性能,具有算法复杂度低、收敛速度快及鲁棒特性强的特点,对单通道盲源分离的理论和算法研究具有重要的科学和应用价值。

本书对于探索单通道盲源分离理论电子信息类、自动控制类、计算机类专业本科生、研究生和专业研究人员来说,是一本极有价值的参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

单通道线性混合信号盲源分离算法研究/郭一娜著. —北京:电子工业出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-121-27917-1

I. ①单… II. ①郭… III. ①混合信号—信号盲分离—研究 IV. ①TN911.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第308375号

策划编辑:徐蔷薇 特约编辑:刘广钦

责任编辑:徐蔷薇

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:北京季蜂印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:720×1 000 1/16印张:12.75 字数:215千字

版 次:2015年12月第1版

印 次:2015年12月第1次印刷

定 价:39.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn

服务热线:(010) 88258888。

作者简介



郭一娜 1981年1月出生于山西省太原市,工学博士,副教授,硕士生导师。2002年中国矿业大学本科毕业后,到太原科技大学工作至今;2009年澳大利亚皇家墨尔本理工大学访问学者。现为英国工程技术协会(IET)会员,山西省高等学校优秀青年学术带头人,太原市科学技术协会第七次代表大会委员,山西省科技厅科学技术奖励专家,山西省中小企业局专家,国际SCI期刊 *Circuits, systems & signal processing* 和 *Biomedical Signal Processing and Control* 的审稿人。近五年,先后获得“山西省科技进步二等奖”“山西省高等学校科技进步二等奖”“山西省科技奉献二等奖”“山西省中青年教师教学基本功竞赛三等奖”“山西省劳动竞赛委员会个人二等功”“博士研究生国家奖学金”“太原市青少年发明竞赛优秀组织工作者称号”“太原科技大学‘三育人’教书育人先进个人称号”和“太原科技大学‘优秀共产党员’称号”。主持国家自然科学基金1项和省部级项目7项;发表学术论文30余篇,其中SCI、EI收录论文近20篇;出版学术著作2部;授权国家专利4项;授权软件著作权4项。

序

相比传统盲源分离，单通道盲源分离因其在现实领域中的实际性，是继多通道盲源分离后的又一信号处理领域的研究热点，已得到了国内外学术界的普遍认可和关注，并在不同的研究领域开始发挥重要作用。单通道盲源分离（SCBSS）这一专业术语及其内涵、“鸡尾酒效应”、机械故障诊断、生物医学信号分离、无线通信技术等 SCBSS 的典型应用问题，已被国内外许多从事数据处理的科研工作者所熟悉。然而，单通道盲源分离背后所隐含的重要研究背景与数学理论基础、SCBSS 的应用范围及相应的各种限制、SCBSS 中“虚拟多通道”的构建方法、SCBSS 不同算法针对不同专业应用问题的研究思路，这些更深层次的内容，并非通过阅读几篇综述文献或相关专业文献，或学习分析 MATLAB 平台工具包中现成算法就能很好掌握的。目前国内还没有一本描述单通道盲源分离理论和算法研究的书来供那些对单通道盲源分离感兴趣的初学者和不同专业领域的科研工作者做参考。这种情况下，本书的出版就显得很有必要。本书大部分素材来源于作者和课题组主要成员开展的原创性研究工作，另外还包含更多的相关理论、新算法及算法的具体实现。本书可以作为电子信息类、自动控制类、计算机类、应用数学等领域的大学教师、研究生和科研工作者的 SCBSS 导引和自学教材。

感谢 Jeanny Herault 和 Bernard Ans 于 1984 年最早提出了独立成分分析，Aapo Hyvärinen 和 Erkki Oja 于 2001 年出版的著作 *Independent Component Analysis*，如果没有他们，就没有后续许多研究者针对盲源分离问题和独立成分分析法的科研工作。感谢许多独立成分分析法的科研工作者，他们的原创性贡献形成了单通道盲源分离的研究基础，并使得本书得问世成为可能。

我们在单通道盲源分离方面的研究工作，是在太原科技大学数字媒体与通



信研究所进行的。研究工作的部分资助来自国家自然科学基金项目(青年)“单通道混合信号多尺度分析与盲源分离”(No. 61301250)、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划“单通道混合信号的盲源分离研究”(晋教科(2015)3号)、山西省回国留学人员科研资助项目“单通道混和肌电信号的盲源分离与手势识别研究”(No. 2014-060)和校博士科研启动项目“表面肌电信号的单通道盲源分离与手势识别研究”(No. 20152003),在此深表谢意。

郭一娜

2015年10月

于太原科技大学

前言

传统的信号处理方法中，一般需要预先的一些有关源信号的先验知识或者信号的混合矩阵的数学模型等条件，然后利用滤波或者变换等方法来估计源信号。但在实际条件下，尤其是处理被动信号时，源信号的先验知识往往无法精确得到，并且由于受到各种不可预知的影响，往往使得源信号的传输矩阵参数发生变化，面对该问题时，传统信号处理技术很难解决。

盲源分离 (Blind Source Separation, BSS) 与传统信号处理的区别在于，它可以利用最少的条件得到最大的信息。“盲源分离”中的“盲”意味着我们对于原始信号所知甚少，而“源分离”意味着从混合量中找出原始信号。这个问题实际上与为多元随机数据寻找一个好的表示法的问题在数学领域非常相似。通过大量的研究，发现仅仅通过考虑信号的统计独立性，就可以找出一个令人惊奇的盲源分离问题的简单求解方法，即在信号为非高斯信号的前提下，信号统计独立即可。

独立成分分析 (Independent Component Analysis, ICA) 是 20 世纪 80 年代初期首先在神经网络建模领域中引入的。它是从多元 (多维) 统计数据中寻找其内在因子或成分的一种方法，已成为近年来神经网络、高级统计学和信号处理等领域中最令人振奋的主题之一。它具有与众不同的优势，即它所寻找的是既统计独立又非高斯的成分。这里的统计独立是指各个成分无论在二维还是三维空间中都相互独立。

以独立成分分析为基础的盲源分离算法主要是针对多路信号的盲源分离的情况。然而，在医学信号处理、语音信号处理、通信信号处理、水声信号处理等领域，由于受设备造价、安装条件等问题的限制，只能放置单一传感器的问题普遍存在。面对此类问题时，经典的盲源分离算法已经不再适用。由此，单



通道盲源分离算法的研究具有非常广泛的现实意义和重要的经济价值。

单通道盲源分离 (Single Channel Blind Source Separation, SCBSS) 是盲源分离的一种极端情况, 在信号的理论模型和源信号无法精确获知的情况下, 仅凭借单通道混合信号 (观测信号) 恢复出各源信号的过程。它有别于传统盲源分离的地方在于: 传统的盲源分离法要求观测信号的数目不少于源信号数目, 而在实际应用中受造价和安装条件等因素限制, 常使观测信号的数目远少于源信号数目, 从而由传统盲源分离法很难恢复出源信号。因此, 如何凭借单通道混合信号恢复出多通道源信号是数学领域中的一个具有挑战性的课题。单通道盲源分离因其独特的优势, 已成为生物医学、海洋环境、声学监测和军事侦察领域中的一个热点课题。

总而言之, 研究现实中单通道盲源分离算法的意义重大, 但是开展理论研究是相当困难的。随着人们对于信号时频域分析理论的深入研究, 人们对于单通道混合信号, 模型预建立或根据已调信号特征的研究应用于分离中, 都取得不少成就。然而这些方法需要提前预知某些先验信息, 与“盲”的理论有些不完全符合, 而虚拟多通道法则无须对混合信号进行了解, 可直接将信号投射到高维空间, 然后利用经典盲源分离算法独立成分分析进行恢复分离。而投射高维空间所得到的数据不仅对于最终恢复效果有明显的影响, 并且对于后期独立成分分析算法处理过程中的迭代次数及收敛速度具有决定性作用。因此, 虚拟多通道的构建是单通道盲源分离法的关键点。

迄今为止, 还没有一本描述单通道盲源分离理论和算法研究的参考书: 既能涵盖数学背景知识、基本原理、求解算法和模型构建, 又能兼顾该算法实际应用现状和前景。本书的出版目的就是希望填补这个空缺, 并充当单通道盲源分离理论的导引。

本书的预期读者可能来自多个学科, 诸如电子信息类、自动控制类、计算机类、应用数学等领域。不论是研究人员、学生还是工程实践领域的工作者都可以使用本书。我们还做了各种努力, 使本书能够便于那些仅有大学微积分、矩阵代数、概率论和统计学基本背景知识的读者阅读。

本书系统地介绍了单通道盲源分离理论、单通道混合信号的模型建立、单通道盲源分离算法的实现。首先, 依据各种信号的统计特性、时频域特性和非



线性特性,将多路源信号线性混合为单路信号并对其分类建模;随后提出一系列时频域相结合的单通道盲源分离算法;最后针对已知的单通道混合信号模型及参数自适应分离并恢复多路源信号。这些算法可提高源信号复原性能,具有算法复杂度低、收敛速度快及鲁棒特性强的特点。大部分素材来源于作者和课题组主要成员开展的原创性研究工作,这从不同主题所占比重的角度可以自然地反映出来。

本书分为五章。

(1) 第1章给出了研究背景和国内外发展现状。

1.1节叙述并分析了单通道盲源分离的提出背景和研究意义。1.2节回顾和综述了盲源分离的国内外发展现状、欠定盲源分离的国内外研究进展和单通道盲源分离在国内外的研究与进展情况。由此引出了单通道盲源分离研究的必要性和构建“虚拟多通道”在单通道盲源分离中的重要性。

(2) 第2章综述了盲源分离理论和独立成分分析法。

盲源分离按照观测信号和源信号数目的关系,可以分为超定、正定和欠定三种情况。2.1节描述了盲源分离的经典理论,盲源分离混合下的信号模型。根据是否存在时间延迟、输入与输出信号之间的映射关系、观测通道数量和源信号数量之间的关系三个角度对盲源分离进行分类,并依据混合方式的不同,介绍了线性瞬时混合模型、线性卷积混合模型、非线性混合模型。2.2节着重介绍了独立成分分析法。首先对独立成分分析的基本概念进行介绍,为了确保独立成分分析模型能被估计,做出一定的假设和约束。然后叙述了独立成分分析的预处理步骤,目标函数的种类和选取。最后介绍了独立成分分析的几种经典算法,以及分离结果的不确定性。2.3节对欠定盲源分离基本概念、原理流程和数学模型进行了相关的描述,并介绍了基于过完备描述的欠定盲源分离和基于信号稀疏特征的欠定盲源分离。2.4节重点介绍了单通道盲源分离的基本模型以及单通道的盲源分离的几种解决方案,包括基于模型法、通道扩展法、稀疏分离法,基于滤波分离法、针对已调信号特征等。最后针对算法的评价标准进行了介绍。

(3) 第3章探讨并构建了单通道线性混合信号数学模型。

为了更好地实现单通道盲源分离,将单通道混合信号分类数学建模。3.1



节回顾了拟合的基本理论和国内外研究现状。3.2 节研究了确定信号拟合与建模。针对周期信号,首先采用 MATLAB 平台的 `cftool` 工具箱求拟合信号的函数,发现该工具箱仅适用于部分周期信号。由此,分别采用分段线性插值法和三次样条插值法进行拟合,发现分段线性插值法得到的图形和拟合的图形相同,保持了给定数据的局部单调性。用三次样条插值法拟合出的图像是一条光滑曲线,不过数据偏离较大。针对非周期信号,先采用 MATLAB 中 `basic fitting` 工具箱拟合数据,大部分非周期信号可以利用工具箱中的模型拟合出波形及公式;而不能由 `basic fitting` 工具箱拟合的非周期信号,根据其数据绘出的波形假设函数,通过多项式拟合或最小二乘法求得参数。3.3 节研究了随机信号拟合与建模。首先列举了平稳随机信号和非平稳随机信号的拟合和建模的具体方法,包括三次样条插值法、最小二乘法及时域参数建模法。然后采用这些算法对平稳随机信号拟合,这些方法得到的方差都比较小,属于正常范围。而在对非平稳随机信号建模时,误差较大。

(4) 第 4 章研究并分析了总体经验模态分解为基础的单通道盲源分离法。

4.1 节叙述了总体经验模态分解 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD) 为基础的单通道盲源分离法理论基础,先后描述了总体经验模态分解、主成分分析、改进的主成分分析和固定点独立成分分析法。4.2 节研究了基于 EEMD 自适应单通道盲源分离法,将单通道混合信号通过 EEMD 按不同的尺度特征,被分解在不同的子空间中,并利用 PCA 算法提取信号中主元,所得信号在进行 ICA 处理,这样明显减少中期和后期选取有用信号时,个人经验在整个算法中所占的比重,提高自适应程度,使得算法更加智能。仿真结果表明:相较 EEMD-ICA 法,该算法由于自适应降维,降低了后期 ICA 处理的复杂度,在 ICA 运算中迭代次数明显减少,对于周期信号的分离效果较好,相关系数最高达到 0.9876;对于混合随机信号分离效果不够理想,相关系数最高不到 0.8。然而,相较 Wavelet-ICA 法和 EEMD-ICA 法,该算法针对随机信号,恢复源信号效果较好,所得的结果稳定。4.3 节研究了基于改进 PCA 和 EEMD 的单通道盲源分离法,在研究基于 EEMD 自适应单通道盲源分离法的基础上,通过对经 EEMD 分解得到的 IMF_s 分量与单通道混合信号进行相关性分析,去除 IMF_s



分量中的弱相关成分,达到首次降维的效果。然后,利用 PCA 算法进一步提取信号中主元,最终通过 ICA 恢复源信号。仿真结果表明:该算法相较 EEMD-ICA 法、基于 EEMD 自适应单通道盲源分离法对随机信号优势更明显,单通道盲源分离效果更好,具有优秀的抗瞬态干扰性,且分离效果随着 SNR 的增大而逐渐提高。

(5) 第 5 章研究并分析了局部均值分解为基础的单通道盲源分离法。

LMD 算法已被证明在某些领域优于 EMD 算法,但与 EMD 类似,同样具有端点效应的缺点。5.1 节叙述了局部均值分解 (Local Mean Decomposition, LMD) 为基础的单通道盲源分离法理论基础,先后描述了局部均值分解和抑制端点效应的局部均值分解,其中端点效应采用自适应端点相位正弦延拓法进行抑制,并针对优化后的 LMD 算法和 LMD 算法的性能进行比较,仿真结果表明抑制端点效应 LMD 算法,具有分解效果好、迭代次数少等优点。5.2 节研究了基于优化后 LMD 单通道盲源分离法,将单通道混合信号通过优化后 LMD 法按不同的尺度特征,被分解在不同的子空间中,得到 PFs 分量,然后 PFs 作为 ICA 算法的输入分量,经过 ICA 处理后得到相互独立分量,通过所得估计矩阵重构源信号,将本算法应用在 ECG 与 sEMG 信号的实际仿真中,结果表明 LMD 为基础的单通道盲源分离法相较 EEMD-ICA 算法,更适用于随机信号的分离,在 ICA 运算中迭代次数明显减少,且恢复效果好、稳定,相对均方根误差 RRMSE 较小。5.3 节研究了基于优化后 LMD 自适应单通道盲源分离法,在基于优化后 LMD 单通道盲源分离法的基础上,通过 PCA 对优化后 LMD 分解得到的 PFs 分量自适应降维,再将降维后的 PFs 通过 ICA 进行独立成分分析,最后估计出源信号。在 ECG 与 sEMG 信号的实际仿真中,结果表明随着 NSR 的增大,基于优化后 LMD 自适应单通道盲源分离法比较基于优化后 LMD 单通道盲源分离法恢复效果更稳定,RRMSE 更小。

由于针对单通道盲源分离研究是一个前景广阔且进展迅速的研究领域,不可能在一本书中囊括每项已经报道过的研究进展。笔者已尽力在适当的地方涵盖了其他研究者的核心贡献,并给出了一个较丰富的文献目录,以便进一步参考。对于可能被遗漏的那些重要贡献,我深表歉意。

目 录

第 1 章

引论	1
1.1 单通道盲源分离的研究意义	3
1.2 单通道盲源分离的研究进展	8
1.2.1 盲源分离的研究与发展	8
1.2.2 欠定盲源分离的研究进展	11
1.2.3 单通道盲源分离的研究进展	13
1.3 本书的研究内容	17

第 2 章

盲源分离基本理论	21
2.1 盲源分离理论与数学模型	23
2.2 独立成分分析法	29
2.2.1 独立成分分析的基本概念	29
2.2.2 独立成分分析的预处理和目标函数	31
2.2.3 独立成分分析的经典算法	33
2.3 欠定盲源分离理论	38
2.4 单通道盲源分离理论	41
2.4.1 单通道盲源分离的基本模型	41
2.4.2 单通道盲源分离算法分类	42
2.4.3 单通道盲源分离算法性能评价标准	46



2.5 本章小结	48
----------------	----

第3章

信号的拟合与建模	49
3.1 拟合的基本理论	52
3.2 确定信号的拟合与建模	57
3.2.1 周期信号的拟合	58
3.2.2 非周期信号的拟合方法	69
3.2.3 非周期信号的拟合与建模	74
3.3 随机信号的拟合与建模	77
3.3.1 随机信号的拟合方法	77
3.3.2 随机信号拟合的基本模型	80
3.3.3 平稳随机信号的拟合与建模	81
3.3.4 非平稳随机信号的拟合与建模	90
3.4 本章小结	102

第4章

总体经验模态分解为基础的单通道盲源分离法	105
4.1 EEMD 为基础的单通道盲源分离法理论基础	109
4.1.1 总体经验模态分解法 (EEMD)	109
4.1.2 主成分分析	115
4.1.3 改进的主成分分析	117
4.1.4 固定点独立成分分析法 (FastICA)	118
4.2 基于 EEMD 自适应单通道盲源分离法的理论基础	120
4.2.1 算法的主要原理	120
4.2.2 算法的流程与具体实现	121
4.2.3 仿真实验与结果分析	123



4.3 基于改进 PCA 和 EEMD 的单通道盲源分离法的理论基础	131
4.3.1 算法的主要原理	131
4.3.2 算法的流程与具体实现	133
4.3.3 仿真实验与结果分析	134
4.4 本章小结	143

第 5 章

局部均值分解为基础的单通道盲源分离法	147
--------------------------	-----

5.1 LMD 为基础的单通道盲源分离法理论基础	149
5.1.1 局部均值分解法	149
5.1.2 抑制端点效应的局部均值分解法	150
5.1.3 LMD 端点效应抑制仿真及分析	152
5.2 基于优化后 LMD 单通道盲源分离法实现原理	155
5.2.1 算法的主要原理	155
5.2.2 算法的流程与具体实现	158
5.2.3 仿真实验与结果分析	159
5.3 基于优化后 LMD 自适应单通道盲源分离法实现原理	169
5.3.1 算法的主要原理	169
5.3.2 算法的流程与具体实现	172
5.3.3 仿真实验与结果分析	172
5.4 本章小结	176

参考文献	179
------------	-----

第 1 章

引 论

- 1.1 单通道盲源分离的研究意义
 - 1.2 单通道盲源分离的研究进展
 - 1.3 本书的研究内容
-



单通道盲源分离 (Single Channel Blind Source Separation, SCBSS) 是在信号的理论模型和源信号无法精确获知的情况下, 凭借单通道混合信号 (观测信号) 恢复出各源信号的过程。单通道盲源分离有别于传统盲源分离的地方在于: 传统的盲源分离法要求观测信号的数目不少于源信号数目, 而在实际应用中受造价和安装条件等因素限制, 常使观测信号的数目远少于源信号数目, 从而由传统盲源分离法很难恢复出源信号。因此, 如何凭借单通道混合信号恢复出多通道源信号是数学领域中的一个具有挑战性的课题。单通道盲源分离因其独特的优势, 已成为生物医学、海洋环境、声学监测和军事侦察领域中的一个热点课题。

1.1 单通道盲源分离的研究意义

在信号处理传统的方法中, 一般需要预先的一些有关源信号的先验知识或者信号的混合矩阵的数学模型等条件, 然后利用滤波或者变换等方法来估计源信号。但在实际条件下, 尤其是处理被动信号时, 源信号的先验知识往往无法精确得到, 并且由于受到各种不可预知的影响, 往往使得源信号的传输矩阵参数发生变化, 面对该问题时, 传统信号处理技术很难解决。

盲源分离 (Blind Source Separation, BSS) 与传统信号处理的区别在于, 它可以利用最少的条件得到最大的信息, 是指在无法精确得知源信号的理论模型和混合矩阵的情况下, 如何根据混叠信号 (观测信号) 恢复或估计各路源信号的一个过程。

盲源分离的过程如图 1.1 所示。该问题“盲”主要有两点: 源信号未知、信号的传输通道参数未知。该问题最初模型来源于“鸡尾酒效应”: 在某鸡尾酒会场, 有多人同时说话, 嘈杂的环境还混杂着背景音乐和其他噪声, 但当人们对某人的谈话感兴趣时, 仍然可以听到这个人的说话内容, 而忽略其他噪声。

经典的盲源分离法, 对于源信号的数目不少于观测信号数目情况, 目前算法如快速独立成分分析算法 (Fast Independent Component Analysis, FastICA)^[1]、