

盲源分离技术及其发展

王春华, 公茂法, 衡泽超

(山东科技大学 信息与电气工程学院, 山东 青岛 266510)

摘要: 盲源信号分离是一种功能强大的信号处理方法, 在生物医学信号处理、阵列信号处理、语音识别、图像处理及移动通信等领域得到了广泛的应用。简要介绍了盲源分离的数学模型、可实现性、可解的假设条件及算法, 综述了盲源分离的发展及研究现状, 提出了其未来的发展方向。

关键词: 盲源分离; 独立分量分析; 发展

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

Technology and development of blind source separation

WANG Chun Hua, GONG Mao Fa, HENG Ze Chao

(College of Information and Electrical Engineering, Shandong University of Science and Technology Qingdao 266510, China)

Abstract: Blind source separation is a powerful methodology for signal processing that has been developing in recent 20 years. It has been, widely used in biomedical signal processing, array signal processing, speech signal recognition, image processing and mobile communication and other fields. This paper introduces the mathematical model, the solvability conditions and the algorithm of blind source separation. Meanwhile the latest progress and the future further development on the blind source separation are pointed out.

Key words: blind source separation; independent component analysis; development

盲源分离 BSS(Blind Source Separation)是信号处理中一个传统而又极具挑战性的问题。BSS 指仅从若干观测到的混合信号中恢复出无法直接观测的各个原始源信号的过程。这里的“盲”指源信号不可观测、混合系统特性事先未知这两个方面。在科学研究和工程应用中, 很多观测信号都可以看成多个源信号的混合, 所谓“鸡尾酒会”^[1]问题就是一个典型的例子。其中独立分量分析 ICA(Independent Component Analysis)^[2]是一种盲源信号分离方法, 它已成为阵列信号处理和数据分析的有力工具, 而 BSS 比 ICA 适用范围更宽。目前国内对盲信号分离问题的研究, 在理论和应用方面也取得了很大的进步, 但是还有很多问题有待进一步研究和解决。

1 盲源分离基本理论

1.1 盲源分离的数学模型

盲信号分离研究的信号模型主要有线性混合模型和卷积混合模型, 盲源分离源信号线性混合是比较简

单的一种混合形式, 典型的 BSS/ICA 问题就是源于对独立源信号的线性混合过程的研究。

1.1.1 盲源分离的线性混合模型

所谓的“鸡尾酒会”问题, 具体描述是: 在一个鸡尾酒会现场, 如果用安放在不同位置的多个麦克风现场录音, 则所记录的信号实际上是不同声源的混合信号。人们希望从这些混合录音信号中把不同的声源分离出来, 这显然不是一件很容易的事, 至少用传统的频域滤波方法行不通。因为不同声源信号的频谱相互重叠在一起, 无法有效地设计滤波器, 但从频谱的角度可以把不同声源分离出来。根据以上描述, 可以把盲源分离问题表示为如图 1 所示的线性模型。为简单起见, 暂时忽略时延、非线性等因素的影响, 即最简单混合系统——线性瞬时混合系统。

图中虚线框中的源信号矢量 $\mathbf{s}=(s_1, s_2, \dots, s_N)^T$ 和线性混合矩阵 \mathbf{H} 都是未知的, \mathbf{W} 为待求的分离矩阵, $\mathbf{y}=(y_1,$

综述与评论 Review and Comment

$y_2, \dots, y_M)^T$ 是分离矩阵 W 的最终输出结果。

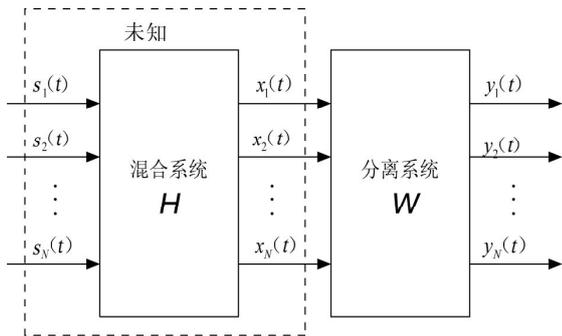


图1 盲源分离的统一线性模型

只有观测信号矢量 $x=(x_1, x_2, \dots, x_M)^T$ 已知，其中的每个分量 $x_i, i=1, 2, \dots, M$ 有相同的观测样本长度。模型中信号数据之间的关系为 $X=H \cdot S, Y=W \cdot X$ ，其中， H 和 W 为 $N \times N$ 的系数矩阵

$$H=(h_{ij})_{N \times N} \quad (1)$$

$$W=(w_{ij})_{N \times N} \quad (2)$$

式中， $H_j^T, W_j^T, j=(1, 2, \dots, M)$ 分别表示 H 和 W 的行向量。为了描述方便，式(1)，式(2)有时也表示为

$$x_j = H_j^T \cdot s, y_j = W_j^T \cdot x, j=(1, 2, \dots, M).$$

盲源分离的最终目的就是寻找分离矩阵 W ，使输出信号 y 尽可能地逼近真实源信号 s 。显然，如果知道了分离矩阵，此问题就变成了非常简单的线性方程组的求解问题。但混合 H 矩阵未知，且在没有任何源信号的先验知识的情况下，源信号的恢复就成了非常困难的问题，即盲源分离问题。

1.1.2 盲源分离的卷积混合模型

在实际系统中，传感器接收到的信号往往是源信号经过不同时延的线性组合，即观测信号是源信号的卷积和，称为线性卷积混合模型。这种混合模型更接近实际。

假设 N 个统计独立的源信号 $s_i(t), i=1, 2, \dots, N$ ，经过卷积混合后被 M 个传感器接收，混合信号为 $x_j(t), j=1, 2, \dots, M$ ，则卷积混合的数学模型可以表示为：

$$x_j(t) = \sum_{i=1}^N a_{ji}(t) * s_i(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{\tau=0}^{L-1} a_{ji}(\tau) s_i(t-\tau) \quad (3)$$

$j=1, 2, \dots, M$

其中， $*$ 表示卷积运算， $a_{ji}(\tau)$ 是第 i 个源信号到第 j 个传感器的冲激响应， L 是冲激响应的最大长度。将式(3)写成向量形式为：

$$x(\tau) = \sum_{\tau=0}^{L-1} A(\tau) s(t-\tau) \quad (4)$$

其中， $\mathbf{x}(t)=[x_1(t), x_2(t), \dots, x_M(t)]^T$ ，

$\mathbf{s}(t)=[s_1(t), s_2(t), \dots, s_N(t)]^T$ ，

A 为混合矩阵。当 $L=1$ 时，该模型就退化为瞬时混合模型。

1.2 盲源分离的可实现性

盲源分离的可实现性就是要研究在多大程度上混合矩阵 H 可以由观测向量 $x(t)$ 来辨识。如果一个方阵在每一行及每一列中有且仅有一个非零元素，则称此方阵为非混合阵。如果 C 是一个非混合阵，则称 $y(t)=Cs(t)$ 是 $s(t)$ 的一个拷贝。 $y(t)$ 和 $s(t)$ 的差异仅表现在各元素的排列顺序及各元素的幅度值上。在盲源分离问题中，由于没有其他先验知识，所以如果能得到源信号的一个拷贝，就可以说完成了盲源分离的工作。

下面讨论为什么在观测信号 $x(t)$ 已知的情况下，仅仅根据“源信号之间是统计独立的”就能得到源信号的一个拷贝。Dannois 定理内容如下：

假设 $s(t)$ 为一个各分量相互独立的矢量(其中至多有一个高斯分量)， C 为一任意的可逆矩阵，如果 $y(t)=Cs(t)$ 的各分量间也是统计独立的，则 $y(t)$ 就是 $s(t)$ 的一个拷贝(即 C 是一个非混合矩阵)。

从该定理中发现，除非矩阵 C 是非混合阵，否则将把一个各分量 t 相互独立的向量(至多有一个高斯分量)转换成为一个各分量不相互独立的向量。这一结论很关键，它意味着只要设法使模型中的输出信号 $y(t)$ 的各分量相互统计独立，便可以实现信号的盲分离。算法的最终目的是使经过分离矩阵之后的输出信号的分量间独立性最大，以此为根据来调整分离矩阵的参数，实现信号的盲分离。

1.3 盲源分离问题的假设条件

由于对源信号和混合矩阵无先验知识可以利用，为了使盲源分离问题可解需对源信号和混合矩阵作某些假设。这些基本的假设条件^[3]包括：

(1)源信号向量 s 的各分量都是零均值的时随机信号，且在任意时刻均相互独立；

(2)最多只有一个源信号分量的概率密度函数是高斯分布；

(3)混合矩阵 H 为可逆的或者列满秩的， $m \geq n$ 。

1.4 盲源分离算法

瞬时线性混叠盲分离代表性的算法主要有 Bell-Sejnowski 最大信息量(Infomax)方法、Amari 自然梯度(Natural Gradient)方法、Cardoso 等变化自适应方法(EASI)、Hyvarinen 快速独立元分析算法(FastICA)、矩阵特征值分解方法等。其他算法很多都是在这些算法的基础上推广或者补充发展起来的，当然盲分离并不仅仅局限于这些算法。盲分离中经常要用到优化运算，就优化手段而言，Infomax 算法、自然梯度算法和 EASI 算法属于梯度下降(上升)寻优算法，收敛速度是线性的，速度略慢

综述与评论 Review and Comment

一些,但属于自适应方法,具有实时在线处理能力;FastICA算法是一种快速而数值稳定的方法,采用拟牛顿算法实现寻优,具有超线性收敛速度,通常收敛速度较梯度下降寻优算法快得多;矩阵特征值分解盲分离方法通过对矩阵进行特征分解或者广义特征分解估计分离矩阵,是一种解析方法,可直接找到闭形式解,没有迭代寻优过程,因此运行速度最快。

相比瞬时线性混叠和卷积混叠盲分离,非线性混叠盲分离难度非常大,主要有自组织映射网络方法、感知器模型法、径向基函数网络法、后非线性混叠盲分离几类方法。

2 盲源分离的发展及发展趋势

目前国际国内对盲源分离问题的研究工作仍处于不断发展阶段,新理论、新方法还在源源不断地涌现。

2.1 盲源分离的发展

1986年,法国学者 Jeanny Hérault 和 Christian Jutten 提出了递归神经网络模型和基于 Hebb 学习律的学习算法,以实现 2 个独立源信号混合的分离。这一开创性的论文在信号处理领域中揭开了新的一章,即盲源分离问题的研究。

其后二十几年来,对于盲信号分离问题,学者们提出了很多的算法,每种算法都在一定程度上取得了成功。从算法的角度而言,BSS算法可分为批处理算法和自适应算法;从代数函数和准则而言,又分为基于神经网络的方法、基于高阶统计量的方法、基于互信息量的方法、基于非线性函数的方法等。

尽管国内对盲信号分离问题的研究相对较晚,但在理论和应用方面也取得很大的进展。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,其后关于盲分离的研究才逐渐多起来。近年来国内各类基金支持了盲信号处理理论和应用的项目,也成立了一些研究小组。

2.2 盲源分离的发展趋势

虽然盲源分离理论方法在最近 20 年已经取得了长足的发展,但是还有许多问题有待进一步研究和解决。

首先是理论体系有待完善。实际采用的处理算法或多或少都带有一些经验知识,对于算法的稳定性和收敛性的证明不够充分。盲源分离尚有大量的理论和实际问题有待解决,例如多维 ICA 问题、带噪声信号的有效分离方法、如何更有效地利用各种先验知识成功分离或提取出源信号、一般性的非线性混合信号的盲分离、如何与神经网络有效地结合、源信号的数目大于观察信号的数目时 ICA 方法等。另外,盲源分离可同其他学科有机结合,如模糊系统理论在盲分离技术中的应用可能是一个有前途的研究方向;盲源分离技术与遗传算法相结合,可以减少计算复杂度,提高收敛速度。如何有效提高算法对源信号统计特性的学习和利用也需要进行深入研究。在硬件实现方面,盲分离问题也存在着极大的发展空间,例如用 FPGA 实现等。

经过人们将近 20 年的共同努力,有关盲分离的理论和算法得到了较快发展,包括盲分离问题本身的可解性以及求解原理等方面的基本理论问题在一定程度上得到了解决,并提出了一些在分离能力、内存需求、计算速度等方面性能各异的算法。由于该问题的理论研究深度和算法实现难度都较大,目前对于盲分离的研究仍然很不成熟,难以满足许多实际应用需求,许多理论问题和算法实现的相应技术也有待进一步探索。

- 参考文献
- [1] BELL A J, SEJNOWSKI T J. An information maximization approach to blind separation and blind deconvolution[J]. *Neural Computation*, 1995, 7(6): 1004-1034.
 - [2] JUTTEN C, HERAULT J. Blind separation of source. Part I: An adaptive algorithm based on neuromimetic architecture[J]. *Signal Processing*, 1991, 24(1): 1-10.
 - [3] 马建仓, 牛奕龙, 陈海洋. 盲信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.

(收稿日期: 2009-03-25)

富士通微电子推出一款多模多频 RF 收发芯片 小巧紧凑型解决方案, 无需外部 SAW 滤波器和 LNA

上海, 2009 年 9 月 16 日- 富士通微电子(上海)有限公司今日宣布推出其进入移动电话 RF 收发器市场以来的首款产品-RF 收发芯片。该款 RF 收发芯片用于移动电话, 支持 2G GSM/GPS/EDGE 和 3G UMTS/HSPA 协议, 并在单一芯片上集成了 3G DigRF(*1)接口。这款新型收发芯片体型小巧, 无需外部 SAW 滤波器(*2)和低噪声放大器(LNA)(*3)。移动电话制造商使用这款芯片可以减少元器件数量、占板面积和物料费。同时, 简单的编程模式有助于大大缩短开发时间, 并简化 RF 和无线平台的集成。MB86L01A 收发芯片的样片即日起供货。