

传感器个数及距离对盲分离影响的分析

吴祖峰, 葛 丽, 李 刚

(电子科技大学教务处 成都 610054)

【摘要】在使用盲分离技术进行信号处理时, 分离高频信号和低频信号对传感器分布的要求是不同的, 而传统的方法在处理高低频混合信号时采用了统一的模式, 得不到很好的分离效果。为了在采用盲分离技术进行高低频混合信号处理时能得到更好的效果, 文章对传感器个数和距离对盲信号分离的影响进行了深入的分析, 并提出了一种能有效处理高频和低频混合信号的模型——分离子系统模型。该模型可以根据频段对传感器距离进行调整, 分别对高、低频混合信号进行分离。通过实验证明分离效果更好。

关键词 盲分离; 传感器; 距离; 奇异值分解; 秩
中图分类号 TN 391 **文献标识码** A

Study of Sensor Spacing and Number in Blind Source Separation

WU Zu-feng, GE Li, LI Gang

(Office of Teaching Affairs, UEST of China Chengdu 610054)

Abstract In blind source separation, high frequency range needs a narrow sensor spacing and low frequency range needs a wide sensor spacing. The traditional methods adopt a fixed sensor spacing to separate the mixtures, so they can't get a good result. The analysis shows that the number and spacing of the sensors can effect the result of blind source separation. This paper presents a method using several separating subsystems. With this method we can get a better result.

Key words blind source separation; sensor; spacing; singular value decom position; matrix rank

盲源分离(Blind Source Separation, BSS)技术是信号处理领域的一个活跃分支, 它的研究始于1986年, 由Herault和Jutten开创, 20世纪90年代得到了迅速发展。目前已有不少算法成功地应用于工程实践, 但是其研究多是基于统一的传感器分布, 而现实世界中的很多信号都是高、低信号混频的, 统一的传感器分布势必影响分离效果。由此, 本文在分析传感器个数及距离对盲分离影响的基础上将讨论一种能更好分离高、低频混合信号的模型。

1 信号的盲源分离(BSS)技术

BSS是指从若干观测得到的混合信号中恢复出无法直接观测的原始信号的方法。在不考虑噪声影响的情况下, 传感器输出信号可以表示为:

$$x(t) = As(t) \quad (1)$$

式中 $x(t)$ 是可以观测得到的, 如果确定了 A , 就可以求出源信号 $s(t)$; $A=C \times B$ 是一个 $m \times n$ 矩阵, 其中 C 是可以根据需要进行选择的, 而 B 是未知的。因此, 在盲源分离中, 主要是确定矩阵 B 。而传感器的个数及位置都会对 B 产生影响, 进而影响到分离的效果。

2 传感器个数对分离效果的影响及其确定方法

在进行盲分离时, 假设源信号个数为 n , 传感器个数为 l , $l < n$ 时, B 最多是 l 行可分的^[1], 无论选择什么样的 C , 最多可以分解出 l 个信号, 因此在进行盲分离之前要确定源信号的个数。

定理 1^[2]: 有噪声的信号源盲分离问题中, 当混合信号的个数多于信号源个数且源信号数据矩阵行满秩,

收稿日期: 2005-03-16

作者简介: 吴祖峰(1978-), 男, 大学本科, 助工, 主要从事信号系统方面的研究。

即 $\text{rank}(s) = n$ 时, 未知信号源个数 n 与混合信号数据矩阵 \mathbf{X} 的主奇异值数相等。

通过定理1计算矩阵的有效秩来确定盲信号个数。由于 \mathbf{A} 是一个 $m \times n$ 的矩阵, 且 $n \geq m$, 假设 $\delta_{11} \geq \delta_{12} \geq \dots \geq \delta_{\text{mm}} \geq 0$ 为矩阵的奇异值, γ_k 为所用两奇异值的比值, 其值为:

$$\gamma_k = \delta_{k+1,k+1} / \delta_{k+2,k+2} \quad (k=1, 2, \dots, m-2) \quad (4)$$

式中 k 值满足 $\gamma_k = \max(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_{m-2})$ 。若选取 $\varepsilon_\delta = k+1$ 作为矩阵的主奇异值数, ε_δ 就是估计的源信号的个数, 取传感器的个数 l 为 ε_δ 或 $\varepsilon_\delta + 1$, 通过实验验证, 易于计算且准确率高。

3 传感器距离对分离效果的影响

传感器的个数决定能否同时把源信号完全分离出来, 传感器之间的距离则会影响分离的效果。用长的传感器距离分离低频信号会得到好的效果, 而用短的传感器距离分离高频信号会得到好的效果。如果能根据信号的频率来调节传感器间的距离, 就可以更好地处理盲分离问题。

4 使用几个子系统进行盲源分离

4.1 一个传感器距离适合的频率范围

前面已经提到一个BSS解决方案通常在干扰信号的方向形成空间零点。一个从源信号 s_p 到分离信号 y_r 的频率响应 $B_{rp}(f)$ 可以分解为:

$$B_{rp}(f) = \sum_{q=1}^Q W_{rp}(f) \cdot H_{qp}(f) \quad (5)$$

式中 $W_{rp}(f)$ 是通过ICA方法得到的分离系统的频率响应。假设波前平面相等, 而且只考虑脉冲响应的直接通路, 一个脉冲响应 h_{qp} 的频率响应 $H_{qp}(f)$ 可以近似于:

$$H_{qp}(f) = e^{j2\pi f c^{-1} d_q \cos \theta_p} \quad (6)$$

式中 θ_p 是源信号 s_p 的方向; d_p 是传感器 q 的坐标。由式(6)、(7)得:

$$B_{rp}(f) = \sum_{q=1}^Q W_{rp}(f) \cdot e^{j2\pi f c^{-1} d_q \cos \theta_p} \quad (7)$$

如果将 θ_p 作为一个变量 θ , $B_{rp}(f)$ 就可以表示为:

$$B_{rp}(f, \theta) = \sum_{q=1}^Q W_{rp}(f) \cdot e^{j2\pi f c^{-1} d_q \cos \theta} \quad (8)$$

它的值也会随着 θ 的改变而改变。

图1是实验中2个信号源和2个传感器的情况。假设 $d_1 = 0$, $d_2 = d$, 则上例中的方向性模式 $B_r(f, \theta)$ 可以简化为:

$$B_r(f, \theta) = W_{r1}(f) + W_{r2}(f) \cdot e^{j2\pi f c^{-1} d \cos \theta} \quad (9)$$

因为, 随着 θ 在 $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ 的变化, $\cos \theta$ 的值从1变到-1, 频率响应 $B_r(f, \theta)$ 的值就在一个圆上移动, 它的中心和半径分别是 W_{r1} 和 W_{r2} 。通过实验, 当 $2\pi f c d < \pi \Leftrightarrow f < c/2d$ 时, 则不会发生空间混淆现象。

如果可以确定两个源信号的方向 θ_1 和 θ_2 , 那么就能确定更精确的频率范围。本文利用MUSIC(Multiple Signal Classification)算法确定源信号的方向^[3]。当频率 f 增加, 两个源信号的相差也会增加。当相差接近 π , 在 θ_1 和 θ_2 方向上的增益差接近最大, 这时信号源盲分离的也达到最好的效果。当相差超过 π 接近 2π 时, 增益差就会减少, 盲分离的效果也会减弱。因此, 相差不能超过 π 也是一个适当的条件, 有:

$$2\pi f c^{-1} d \cos \theta_1 - 2\pi f c^{-1} d \cos \theta_2 \leq \alpha \pi \Leftrightarrow f \leq \alpha c / 2d (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (10)$$

式中 α 是允许相差超过 π 多少的一个系数, 可以根据需要设定。

4.2 子系统模型介绍

在进行盲分离时, 高频和低频信号对传感器距离要求的不同, 如果要达到好的分离效果, 则需要设计一个系统, 使其传感器距离可以根据频段分别配置, 对高频信号采用短的传感器距离, 而对低频信号采用

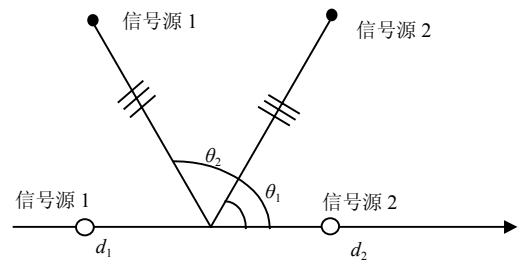


图1 信号源、传感器变化示意图

长的传感器距离。

设系统由几个分离子系统 $sub_i (i = 1, 2, \dots)$ 和并联的传感器组组成, 各子系统作为一特定频段的带通滤波器负责该频段混合信号的分离。传感器的距离可以在各子系统中分别设定。整个分离系统的流程如下:

(1) 为每个子系分配一个频段; (2) 每个子系统 sub_i 产生已分离信号 y_r^i , 它只包括这个子系统分离的特定频段; (3) 将每个子系统的输出结合, 形成整个系统的输出:

$$y_r = \sum_i y_r^i \quad (11)$$

构造一个子系统的最简单的方法就是把带通滤波器串联起来形成一个简单的分离系统^[4-5]。但这样会增加整个系统的延迟。因此改用FIR滤波器来进行信号分离, 它同时充当带通滤波器。假设一个子系统 sub_i 负责一个频段 $f_{low}^i \leq f \leq f_{high}^i$ 。首先, 这个频段的频率响应 $w_{rq}(f)$ 可以通过ICA方法计算; 然后, 这个频段范围之外 ($f \leq f_{low}^i$ 和 $f_{high}^i \leq f$) 的频率响应 $W_{rq}(f)$ 可以通过调整滤波器, 使输出为0; 最后, 可以通过对所有的频率响应 $W_{rq}(f)$ 的DFT反变换得到 $W_{rq}(k)$ 。

图2是两个源信号用两个子系统分离的例子。第1个子系统 sub_1 和它的传感器组 (x_1^1, x_2^1) 是处理低频段信号的, 第2个子系统 sub_2 和它的传感器组 (x_1^2, x_2^2) 是处理高频段信号的。在进行分离的时候, 还可以让不同的子系统共享同一个传感器, 就像例子中的 x_2^1 和 x_2^2 。

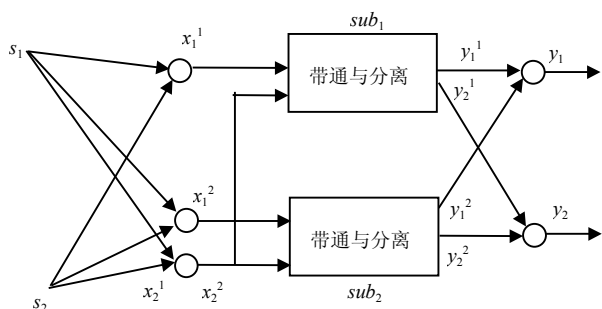


图2 源信号用子系统分离示意图

表1 实验中的信噪比

$(d_2 - d_1)/\text{Hz}$	传感器距离/mm	
	28.3	141.5
0~1 029	15.37 dB	19.74 dB
1 029~4 000	23.50 dB	23.15 dB
0~4 000	15.87 dB	20.04 dB

本文用上面的系统对两个语音混合信号进行分离, 如图1所示。首先, 根据奇异值分解法^[2]确定出源信号的个数。通过矩阵计算, 确定源信号个数为2个, 使用2个传感器来进行分离。然后, 计算出两个信号源的方向。采用MUSIC算法^[3], 估计出两个信号源的方向分别是53°和143°。本文选取短的传感器距离为28.3 mm, 长的传感器距离为141.5 mm。由式(10)知, 在 $\sigma = 1.2$ 的时候, 可以计算出短的传感器距离适合的频段为1 029~4 000 Hz; 而长的传感器距离适合的频段为0~1 029 Hz。表1列出了实验中的信噪比, 可以看到使用分离子系统可以得到更高的信噪比, 更有利于把噪声分离出来, 得到了更好的分离效果。

6 结论

在盲分离中, 传感器的个数和距离对盲分离有着非常重要的影响, 要同时分离出所有的源信号, 必须保证传感器的个数大于信号源的个数。在高频、低频混合信号的盲分离中, 采用一种可以为不同频段分配不同传感器距离的分离子系统模型, 对于高频信号应该采用短的传感器距离, 而对低频信号应该采用长的传感器距离。通过实验证明, 使用这种模型可以得到更好的分离效果。

参 考 文 献

- [1] CAO X R, LIU R W. General approach to blind source separation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996(3): 562-571.
- [2] 张洪渊, 贾 鹏. 确定盲分离中未知信号源个数的奇异值分解法[J]. 上海交通大学学报. 2001, (8): 1 155-1 158
- [3] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1986, 34: 274-280.
- [4] SARUWATARI H, KURITA S, TAKEDA K. Blind source separation combining frequency-domain ICA and beamforming[J]. IEEE International Conference, 2001, 5:2 733-2 736.
- [5] HOPGOOD J R, RAYNER P J W, YUEN P W T. The effect of sensor placement in blind source separation[J]. Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics, 2001(1): 95-98.

编辑 徐安玉