

doi: 10.7690/bgzd.2015.08.010

## 一种消除 BSS 不确定性的新方法

周 君<sup>1</sup>, 任喜顺<sup>2</sup>, 王政刚<sup>1</sup>, 席 静<sup>3</sup>

(1. 中国人民解放军 73681 部队 521 分队, 南京 210016; 2. 中国人民解放军 65523 部队, 辽宁 大石桥 115100;  
3. 重庆鹰谷光电有限公司, 重庆 400060)

**摘要:** 针对盲源分离技术处理通信信号时会出现域不确定性的问题, 提出一种新型的消除 BSS 不确定性的方法。通过分析 BSS 模型及其产生不确定性的原因, 利用相邻信号帧交叠部分的相似性, 进行信号重组, 同时消除幅度不确定性、相位不确定性和帧不确定性; 并分别采用人工合成的信号和人类语音信号进行验证。仿真结果表明: 该算法很好地解决了不确定性产生的影响, 达到了消除不确定性的目的。

**关键词:** 盲源分离; 最优分离矩阵循环迭代; 信号帧; 帧交叠

**中图分类号:** TJ02 **文献标志码:** A

## A New Method of Eliminating BSS Uncertainty

Zhou Jun<sup>1</sup>, Ren Xishun<sup>2</sup>, Wang Zhenggang<sup>1</sup>, Xi Jing<sup>3</sup>

(1. No. 521 Team, No. 73681 Unit of PLA, Nanjing 210016, China; 2. No. 65523 Unit of PLA, Dashiqiao 115100, China;  
3. Chongqing Eagle Valley Optoelectronic Limited, Chongqing, 400060, China)

**Abstract:** Aiming at the region uncertainty of blind source separation (BSS) in dealing with communication signal, put forwards a new method for eliminating BSS uncertainty. Through analyzing BSS model and reason of uncertainly, use similarity of neighbor signal frame overlap, carry out signal recombination, eliminate amplitude uncertainty, phase uncertainty and frame uncertainty at the same time; then, use validate method by artificial synthesis signal and artificial voice signal. The simulation results show that: the method can eliminate influence of uncertainty or even reach the goal of eliminating uncertainty.

**Keywords:** BSS; optimal separation matrix loop iteration; signal frame; frames overlap

### 0 引言

在近三十年里, 盲源分离 (blind source separation) 作为盲信号处理的强大工具, 已经成为研究热点。独立成分分析是实现盲源分离的主流方法, 已经广泛地被应用于语音信号处理<sup>[1]</sup>、图像信号处理<sup>[2]</sup>、生物信号处理<sup>[3]</sup>及雷达技术<sup>[4]</sup>。1982 年, Barness 等人最先研究了盲源分离技术在通信中的应用<sup>[5]</sup>。通信信号处理中盲源分离技术的应用主要是在提取混合信号中的期望信号方面, 特别是抗干扰通信。另外一种应用是信道复用。沈越泓教授提出了无线信道统计复用就是利用了盲源分离技术实现了通信信号在无线信道的复用<sup>[6-7]</sup>, 该方法极大地提高了无线信道频谱利用率。

在采用盲源分离技术处理通信信号时, 通常会有时域不确定性的问题。不确定性有以下 2 种: 1) 由于复幅度的不确定性, 导致了分离后信号的相位不确定和幅度不确定; 2) 分离信号的帧不确定。由于不确定性的存在, 特别是帧不确定, 导致信号无

法正确分离。

目前已经有很多研究方法可消除分离中的不确定性, 在文献[8-9]中采用了基于相关系数的算法。算法的缺点是对混合矩阵的限制太严格; 尚晓辉等人提出了最优分离矩阵循环迭代的方法来消除不确定性<sup>[10]</sup>, 该方法在时不变信道中应用较好, 不适于快时变信道; 焦卫东等<sup>[11]</sup>提出了一种基于傅里叶变换和最大相关准则相结合的方法, 该方法则要求信号在不同的频率上。

基于此, 笔者提出了一种新算法, 用于消除盲分离中的不确定性。该方法在分离时将相邻的信号帧取时长为  $\tau$  的交叠部分。分离后, 根据相邻信号帧交叠部分的相似性消除不确定性。

### 1 BSS 模型和不确定性

#### 1.1 BSS 的数学模型

假定  $N$  路源信号位零均值实信号, 表示为  $\mathbf{S} = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]$ ,  $N$  路源信号通过信道进行线性混合得到  $M$  路接收信号

收稿日期: 2015-02-11; 修回日期: 2015-04-05

作者简介: 周 君(1983—), 女, 安徽人, 硕士, 助理工程师, 从事程控交换、载波信道估计与均衡研究。

$X = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]$ 。文中采用的模型为适定条件下线性瞬时混合模型，且忽略了噪声影响。接收信号与源信号的关系可表示为：

$$X = AS \tag{1}$$

由于是适定条件下 ( $N=M$ )，假定分离矩阵为  $W$ ，所以估计信号的表达式为：

$$\hat{S} = WX \tag{2}$$

文中所采用的 BSS 模型如图 1 所示。

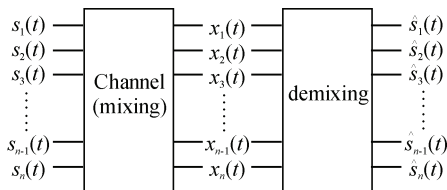


图 1 BSS 模型

### 1.2 不确定性

当采用 BSS 逐帧处理信号时，就会产生不确定性，影响信号的分离。一种是由于未知复幅度的存在，导致分离时产生了相位不确定和幅度不确定。另外一种不确定性是帧不确定，由于分离信号帧的置换产生。图 2 描述了帧不确定性对 BSS 带来的影响。图 2(a)表示源信号，图 2(b)表示分离后的信号，通过对比可以清晰地看到：幅度不确定使相邻的信号帧产生了幅度差，相位不确定使信号帧产生不确定的反转，帧不确定使分离后的信号帧无法正确连接导致无法正确分离信号。

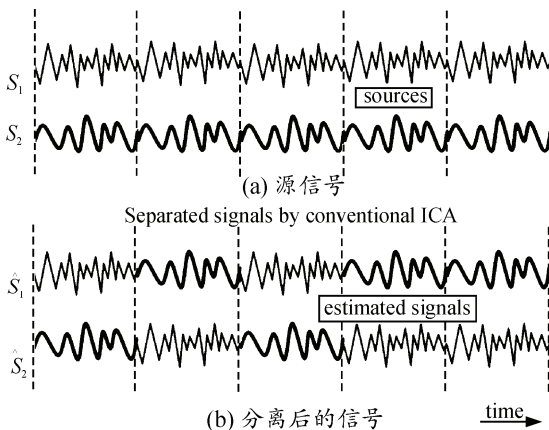


图 2 BSS 的不确定性

## 2 不确定性消除算法

在实际应用中，由于不确定性的存在限制了 BSS 的应用前景。笔者提出了一种新的消除不确定性的算法，该算法利用相邻信号帧交叠部分的相似性来消除不确定性。笔者提出的算法可以同时消除

幅度不确定性、相位不确定性和帧不确定性。下面将阐述所提出的算法。

现将  $N$  路源信号分解为若干个信号帧，公式 (3) 为第  $i$  路源信号帧的表达形式：

$$s_i(t) = [s_i^{N_f}(t - N_f T_f), s_i^{N_f-1}(t - (N_f - 1)T_f), \dots, s_i^{N_f-j}(t - (N_f - j)T_f), \dots, s_i^0(t)] \tag{3}$$

$N_f$  表示信号分解的帧数， $T_f$  表示信号帧的长度。

为了表达方便，将公式 (3) 简写为公式 (4)

$$s_i = [s_i^{N_f}, s_i^{N_f-1}, \dots, s_i^{N_f-j}, \dots, s_i^0] \tag{4}$$

分离后的估计信号为

$$\hat{s}_i = [\hat{s}_i^{N_f}, \hat{s}_i^{N_f-1}, \dots, \hat{s}_i^{N_f-j}, \dots, \hat{s}_i^0] \tag{5}$$

$\hat{s}_i$  为源信号  $s_i$  的估计信号。由于不确定性的存在，估计信号帧之间会产生幅度、相位和帧顺序的错误衔接。

笔者算法中采用了与传统方式不同的信号帧形式，在相邻的信号帧之间，留取一定长度的交叠，使相邻的信号帧之间存在重叠的部分。交叠部分的长度可根据需要选取。公式 (6) 为相应的数学表达：

$$s_i(t) = [s_i^{N_f}(t - N_f T_f), s_i^{N_f-1}(t - (N_f - \rho)T_f), \dots, s_i^{N_f-j}(t - (N_f - j \cdot \rho)T_f), \dots, s_i^0(t)] \tag{6}$$

式中  $\rho$  为常数， $1 - \rho$  为相邻信号帧之间的交叠比例 ( $0 < \rho < 1$ )。当  $\rho = 1$  时，信号帧与帧之间没有交叠。

为了表示方便，用公式 (7) 表达公式 (6)

$$s_i = \left[ \left( s_{i,0}^{N_f}, s_i^{N_f}, s_{i,1}^{N_f} \right), \left( s_{i,0}^{N_f-1}, s_i^{N_f-1}, s_{i,1}^{N_f-1} \right), \dots, \left( s_{i,0}^{N_f-j}, s_i^{N_f-j}, s_{i,1}^{N_f-j} \right), \dots \right] \tag{7}$$

式中： $(s_{i,0}^{N_f-j}, s_i^{N_f-j}, s_{i,1}^{N_f-j})$  为第  $i$  路信号的第  $j$  帧； $s_i^{N_f-j}$  为信号帧中未重叠的部分； $s_{i,0}^{N_f-j}$  为与上一个信号帧重叠的部分； $s_{i,1}^{N_f-j}$  为与下一个信号帧重叠的部分。

进行 BSS 处理后，第  $i$  路估计信号为

$$\hat{s}_i = \left[ \left( \hat{s}_{i,0}^{N_f}, \hat{s}_i^{N_f}, \hat{s}_{i,1}^{N_f} \right), \left( \hat{s}_{i,0}^{N_f-1}, \hat{s}_i^{N_f-1}, \hat{s}_{i,1}^{N_f-1} \right), \dots, \left( \hat{s}_{i,0}^{N_f-j}, \hat{s}_i^{N_f-j}, \hat{s}_{i,1}^{N_f-j} \right), \dots \right] \tag{8}$$

首先，对估计信号进行归一化，可以消除幅度不确定性。然后，比较相邻帧交叠部分的相似性，选择相似性最大的帧进行连接作为最终的估计信号。取第  $j$  帧和第  $j+1$  帧为例：

$$\begin{bmatrix} \vdots \\ (\hat{S}_{i,0}^{N_f-j-1}, \hat{S}_i^{N_f-j-1}, \hat{S}_{i,1}^{N_f-j-1}), (\hat{S}_{i,0}^{N_f-j}, \hat{S}_i^{N_f-j}, \hat{S}_{i,1}^{N_f-j}) \\ \vdots \\ (\hat{S}_{k,0}^{N_f-j-1}, \hat{S}_k^{N_f-j-1}, \hat{S}_{k,1}^{N_f-j-1}), (\hat{S}_{k,0}^{N_f-j}, \hat{S}_k^{N_f-j}, \hat{S}_{k,1}^{N_f-j}) \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (9)$$

比较重叠部分的相似度：

$$\text{similarity}_{i,k} = \left\| \hat{S}_{i,1}^{N_f-j}, \hat{S}_{k,0}^{N_f-j+1} \right\| \quad i, k \in (1, 2, \dots, N) \quad (10)$$

对于固定的  $i$ ，可以得到  $N$  个  $\text{similarity}_{i,k}$ 。笔者将  $\text{similarity}_{i,k}$  最大的第  $k$  路信号相应的帧  $\hat{S}_{k,0}^{N_f-j+1}$  与  $\hat{S}_{i,1}^{N_f-j}$  信号帧进行衔接，作为一路源信号的估计信号。为消除相位不确定性的影响，笔者用公式 (11) 代替公式 (10) 来计算相似度：

$$\text{similarity}_{i,k} = \left\| \left| \hat{S}_{i,1}^{N_f-j} \right|, \left| \hat{S}_{k,0}^{N_f-j+1} \right| \right\| \quad i, k \in (1, 2, \dots, N) \quad (11)$$

式中的  $|\cdot|$  表示绝对值。绝对值使所有的数值变为正值，消除了相位不确定给相似度计算带来的影响。

在解决信号衔接的问题后，再处理相位不确定的问题。假定当前估计的信号帧衔接正确，笔者采用公式 (12)，通过比较  $\text{similarity}_{i,k}$  和  $\text{similarity}_{i,k}^*$  来调整相位：

$$\text{similarity}_{i,k}^* = \left\| \hat{S}_{i,1}^{N_f-j}, -\hat{S}_{k,0}^{N_f-j+1} \right\| \quad i, k \in (1, 2, \dots, N) \quad (12)$$

数值大的一个即为正确的相位。当然，如果第一帧估计信号的相位与源信号不同的话，则整路估计信号都为源信号的反转，但是，这不影响对源信号的识别。

下面总结算法如下：

1) 利用公式 (6) 对接收信号分帧处理；2) 用 BSS 方法处理分离接收信号帧；3) 将分离后的信号帧进行归一化；4) 通过公式 (11) 对信号帧进行调整；5) 通过对比  $\text{similarity}_{i,k}$  和  $\text{similarity}_{i,k}^*$  来调整相位，消除相位不确定。

### 3 仿真与数据

下面分别采用人工合成的信号和人类语音信号来验证文中的算法。图 3 为人工合成信号，图 4 为人类语音信号。

图 3(a)为源信号，分别是正弦信号，方波信号和高斯随机信号。源信号通过线性瞬时混合产生接收信号，将其分解为 5 帧。图 3(b)采用了文中所提的不确定性消除算法，图 3(c)未采用不确定性消除算法。很明显，图 3(c)所示的估计信号存在显著的幅度、相位和帧不确定。信号没能正确的分离，无法提取源信号的估计。图 3(b)采用了文中所提出的不确定性消除算法，很好地消除了幅度、相位和帧不确定，较好地对接了源信号进行了估计。

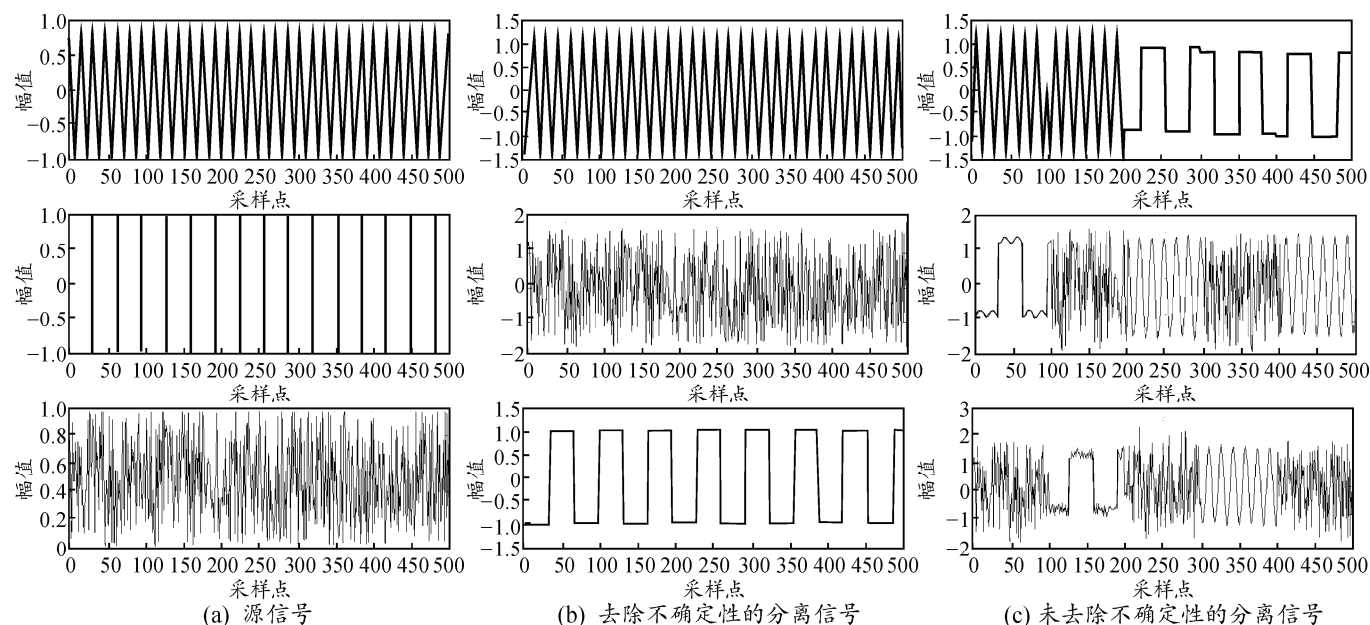


图 3 人工合成信号分离效果对比

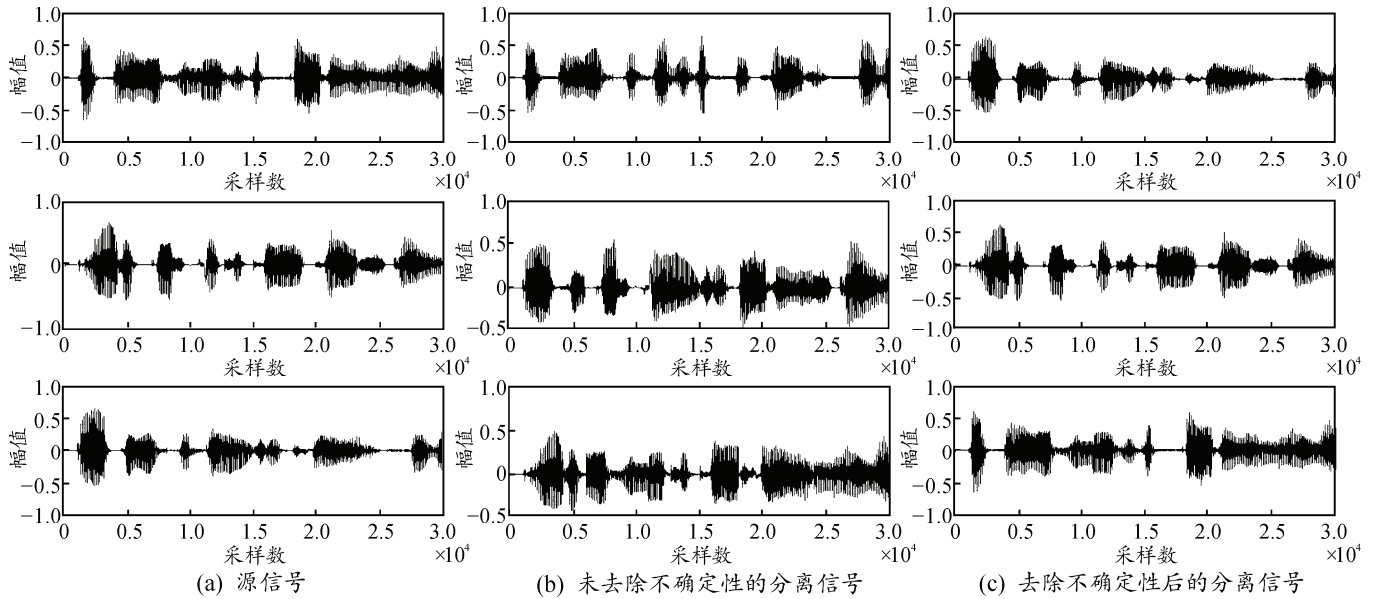


图 4 人类语音信号分离效果对比

图 4 为人类语音信号分离效果展示。图 4(a)为三路语音源信号，图 4(b)为采用文中所提出的不确定性消除算法处理的分离信号，图 4(c)为未采用不确定性消除算法处理的分离信号。结果依然表明，笔者所提的算法可以很好地解决信号分离时产生的不确定性问题。

#### 4 总结

笔者利用相邻信号帧交叠部分相似性的方法，很好地解决了不确定性产生的影响。本文提出的算法有 3 项优势：1) 可以成功地消除相位、幅度和帧不确定性；2) 对于信号传播的信道条件没有特别要求，对于快时变信道，该算法依然可用；3) 对分离算法没有限制，可以采用任何分离算法。

当然，该算法也存在着缺点：由于信号帧存在交叠且处理过程中需要进行大量的比较，使得算法复杂度极大增加，要耗费大量的时间，这就对信号处理的实时性提出了挑战，也是该算法实用化需要进一步做的工作。

#### 参考文献：

[1] Ehlers F, Schuster H. Blind separation of convolutive mixtures and an application in automatic speech recognition in a noisy environment[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1997, 45(10): 2608-2612.  
 [2] He Z Y, Liu J, Yang L X. Blind separation of images using edgeworth expansion based on ICA algorithm[J]. Chinese Journal of Electronics, 1999, 8(3): 278-282.

[3] Baker S N, Kilner J M, Ahmed A. Used of a blind separation algorithm to remove electrical cross-talk from multiple EMG recordings[J]. in Proc. J. of Physiology, 1998, 509: 168-172.  
 [4] Cichocki A, Unbehauen R, Moszczynski R, et al. A new on-line adaptive learning algorithm for blind separation of source signals[M]. In: Proc. ISANN94, 1994: 406-411.  
 [5] Barness J W, Carlin Y, Steinberger M L. Boot-strapping adaptative interference cancellers[Z]: some practical limitations.  
 [6] Amishima T, Okamura A, Morita S, et al. Permutation Method for ICA Separated Source Signal Blocks in Time Domain[C]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems.  
 [7] Shen Yuehong, Xu Kui, Chen Shouqi, et al. The wireless communication system of statistical multiplexing[P]. National invention patent, application number 200910028468.0.  
 [8] Jin Guimei, Lee Yongbing, Zhang Li. Phase Adjustment and Sequence of Blind Source Separation Based on Correlation[J]. Modern Electronic Technology, 2010, 314(3): 55-58.  
 [9] Chen Shizhou, Shen Yuehong, Li Hui. Permutation algorithm Based on correlation coefficient matrix in Wireless Statistic Division Multiplexing[C]//ICISCI. Harbin: IEEE, 2011: 229-233.  
 [10] Shang Xiaohui, Shen Yuehong, Wang Jiangong, et al. Permutation algorithm of blind source separation based on the iteration of the optimal separation matrix[J]. Journal of Military Communications Technology, 2011, 32(2): 7-11.  
 [11] Jiao Weidong, Yang Shixi, Qian Suxiang, et al. A New Method for Recognition of Independent Noise Sources of Complex System under Strong Noisy Environment[R]. China Mechanical Engineering, 2006: 7.