

经时频掩码的欠定混叠信号的盲提取

肖明¹, 高峰², 孙功宪², 谢胜利²

(1. 广东石油化工学院 广东省石化装备故障诊断重点实验室, 广东 茂名 525000; 2. 华南理工大学 电子与信息学院, 广东 广州 510640)

摘要: 针对欠定非完全稀疏信号的盲源估计问题, 提出了一个新颖的盲提取算法。算法融合非完全稀疏信号的盲提取算法和 DUET 方法, 先利用已估计的混叠矩阵计算源信号的提取矢量和源方向的法矢量, 再经线性变换更新混叠信号和混叠矩阵, 后采用时频掩码方法恢复源信号。几个语音信号的实验显示算法的性能和实用性。

关键词: 欠定盲信号分离; 稀疏成分分析; 时频掩码; 盲提取

中图分类号: TN911.23

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)08-0077-08

Blind extraction of underdetermined mixtures via time-frequency mask

XIAO Ming¹, GAO Feng², SUN Gong-xian², XIE Sheng-li²

(1. Key Lab of Fault Diagnosis for Petrochemical Equipment of Guangdong, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China;

2. School of Electrics & Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: For blind source estimation problem of underdetermined and non-completely sparse signals, a novel blind extraction algorithm was proposed. The algorithm combined the non-completely sparse blind extraction algorithm with the DUET approach. It computed firstly the extraction vector of source and the normal vector of source direction, and then renewed the mixtures and the mixing matrix using a linear transform, and recovered the source using time-frequency mask method finally. Several speech signal experiments demonstrate its performance and practical.

Key words: underdetermined blind source separation; sparse component analysis; time-frequency mask; blind source extraction

1 引言

欠定盲信号分离的特征是混叠信号个数少于源信号个数, 解决欠定盲信号分离的基本策略是基于稀疏表示的两步法^[1~9]。两步法分为矩阵估计和源估计 2 个步骤。矩阵估计最具有代表性的算法有 DUET^[5]、TIFROM^[6]和 MRISSE^[7], 源估计最具代表

性的算法有最短路径法^[3]、 l^0 -范数解^[8]、 l^1 -范数解^[9]和 DUET 算法^[5]。其中, 二进制时频掩码方法是欠定系统解混的重要方法, 它与最短路径法、 l^1 -范数解、 l^0 -范数解有明显的区别: 它要求源信号相互不重叠, 即在时频域的每个频率点都仅有一个源信号。虽然实际混叠并不能保证该条件, 但是可以近似地视为源信号相互不重叠。DUET 算法正是利用

收稿日期: 2011-05-10; 修回日期: 2012-04-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61003170, 60974072); 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2010CB731800); 中国博士后科学基金资助项目(20100470920); 茂名市科技计划基金资助项目(2011B01041)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(61003170,60974072); The National Basic Research Program of China (2010CB731800); China Postdoctoral Science Foundation Funded Project(20100470920); The Science and Technology Plan Project of Maoming (2011B01041)

了二进制时频掩码，取得了很好的分离效果。在非完全稀疏的情况下，改善源信号恢复性能，一直是一个挑战性问题，DUET 算法也需要进一步地改善。

本文针对上述问题，融合 DUET 算法和非完全稀疏信号的盲提取算法^[10,11]，提出了基于时频掩码的盲提取算法。该算法先通过时域盲提取方法形成 2 个新的混叠信号，再经时频掩码方法提取源信号，以此类推，逐一提取每个源信号。最后，用几个语音信号的实验来验证算法的性能和实用性。

2 盲提取矢量

在无噪声和回波的时候，所接收到的 n 个混叠信号 $\mathbf{x}(t)$ 为

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A}\mathbf{s}(t) \quad (1)$$

其中，矩阵 \mathbf{A} 是线性混叠矩阵， $\mathbf{s}(t)$ 是 m 个源信号的矢量。本文仅考虑 2 个混叠信号的情况 ($n=2$)，混叠信号矢量为 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t) \ x_2(t)]^T$ ，混叠矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \cos \theta_2 & \cdots & \cos \theta_m \\ \sin \theta_1 & \sin \theta_2 & \cdots & \sin \theta_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中角度 θ_k 表示第 k 个源方向的方向角，而源方向为矩阵 \mathbf{A} 的列矢量 $\mathbf{a}_k = [\cos \theta_k \ \sin \theta_k]^T$ ($k=1,2,\dots,m$)，符号 $[\cdot]^T$ 表示矩阵的转置。

根据非完全稀疏情况下的盲提取算法^[10]，提取第 j 个源信号，需要先确定源方向 \mathbf{a}_j 的法矢量：

$$\mathbf{b}_j = [-\sin \theta_j \ \cos \theta_j] \quad (3)$$

则 $\mathbf{b}_j \mathbf{a}_j = 0$ ，用法矢量 \mathbf{b}_j 乘以混叠信号矢量可得到不包含第 j 个源的新混叠信号：

$$y_1(t) = \mathbf{b}_j(t) \mathbf{x}(t) \quad (4)$$

又设

$$x_0(t) = \mathbf{a}_j^T \mathbf{x}(t) \quad (5)$$

则信号 $x_0(t)$ 含有第 j 个源信号，并存在其他源的干扰。于是引入系数 λ ，设

$$y_2(t) = x_0(t) - \lambda y_1(t) \quad (6)$$

即用信号 $y_1(t)$ 来降低干扰。现计算信号 $y_2(t)$ 的平均功率：

$$E[y_2(t)^2] = E[x_0(t)^2] - 2\lambda E[x_0(t)y_1(t)] + \lambda^2 E[y_1(t)^2] \quad (7)$$

其中， $E[\cdot]$ 是数学期望。在式(7)中，为了希望 $y_2(t)$ 中的干扰最小，必须使其功率最小，即

$$\frac{dE[y_2(t)^2]}{d\lambda} = 0 \quad (8)$$

易得：

$$\lambda = E[x_0(t)y_1(t)][E(y_1(t)^2)]^{-1} \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (6) 得

$$y_2(t) = x_0(t) - E[x_0(t)y_1(t)][E(y_1(t)^2)]^{-1} y_1(t) \quad (10)$$

再将式 (4)、式 (5) 代入式 (10) 得

$$y_2(t) = \{\mathbf{a}_j^T - E[(\mathbf{a}_j^T \mathbf{x}(t))(\mathbf{b}_j \mathbf{x}(t))][E(\mathbf{b}_j \mathbf{x}(t))^2]^{-1} \mathbf{b}_j\} \mathbf{x}(t) \quad (11)$$

令 $y_2(t) = \mathbf{w}_j \mathbf{x}(t)$ ，其中，

$$\mathbf{w}_j = \mathbf{a}_j^T - E[(\mathbf{a}_j^T \mathbf{x}(t))(\mathbf{b}_j \mathbf{x}(t))][E(\mathbf{b}_j \mathbf{x}(t))^2]^{-1} \mathbf{b}_j \quad (12)$$

式中 \mathbf{w}_j 是源信号的提取矢量。这里的最小干扰是在源信号保持源信号完好不变的情况下的最小干扰，所以 $y_2(t)$ 仍然包含较大的干扰。

将 \mathbf{b}_j 和 \mathbf{w}_j 组成了非奇异矩阵 $\begin{bmatrix} \mathbf{b}_j \\ \mathbf{w}_j \end{bmatrix}$ ，对混叠信号和混叠矩阵进行线性变换。线性变换后，混叠信号变为 $\mathbf{y}(t) = [y_1(t) \ y_2(t)]^T$ ，混叠矩阵变为

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \cos \phi_1 & \cos \phi_2 & \cdots & \cos \phi_m \\ \sin \phi_1 & \sin \phi_2 & \cdots & \sin \phi_m \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中混叠矩阵 $\tilde{\mathbf{A}}$ 的源方向角度由 $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_j \\ \mathbf{w}_j \end{bmatrix} \mathbf{A}$ 确定，

令 \mathbf{C} 的列矢量 $\mathbf{c}_i = c_i [\cos \phi_i \ \sin \phi_i]^T$ ，并按角度大小排序 $0 \leq \phi_1 < \cdots < \phi_m < \pi$ ， $\phi_j = \pi/2$ ，即 $\tilde{\mathbf{A}}$ 的第 j 列为矢量 $[0 \ 1]^T$ 。综上，混叠信号和混叠矩阵更新如下：

$$\mathbf{x}(t) \leftarrow \mathbf{y}(t) \quad (14)$$

$$A \leftarrow \tilde{A} \quad (15)$$

更新后的混叠信号和叠矩阵所具有的特征：①第 j 个源信号为提取源，在 2 个混叠信号中，前一个混叠信号不含提取源，后一个混叠信号的提取源成分非常强，非提取源的干扰已经被抑制。②非提取源的散落点已经远离提取的源信号方向 $[0 \ 1]^T$ ；③更新是一个线性变换，源信号仅仅按比例被缩小或放大，其波形没有变化。

以上 3 个特征将确保后续的时频掩码方法有更好的源提取效果。同时，从式 (12) 可知，提取矢量与源信号幅度强弱有关，在不等幅的情况下，混叠信号的更新能够更加有效地抑制非提取源的干扰。

下面以 SiSEC2008^[11]提供的混叠矩阵和源信号为例，观察混叠矩阵和混叠信号更新后的变化情况。SiSEC2008 提供的源方向角度分别为 70° 、 50° 、 37.5° 和 22.5° ，源方向用实线在图 1 中标注。因为相邻 2 个源方向的角平分线是确定时频掩码的分界线，所以作它们的角平分线，角度分别 60° 、 43.75° 、 30.0° 和 -53.75° ，用虚线表示。SiSEC2008 提供的源信号为 4 个女讲话声，在实验 1 中，4 个女声的功率相同，在实验 2 中，缩小第 2、3 个源信号的幅度为实验 1 中的 0.3 倍。根据式 (3) 和式 (12)，计算法矢量 b_j 和提取矢量 w_j ，然后更新混叠矩阵和混叠信号。4 个源信号有 4 个提取矢量，需 4 次更新混叠矩阵和混叠信号。

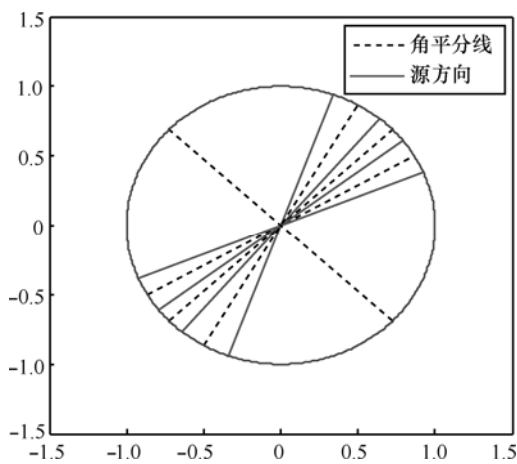
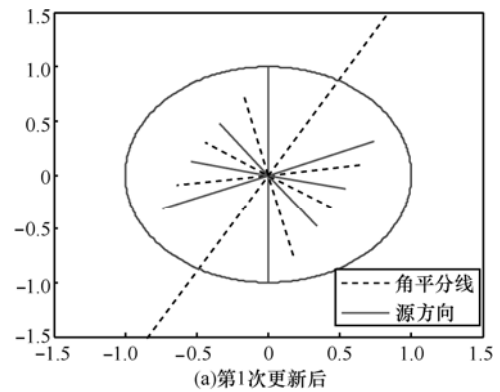


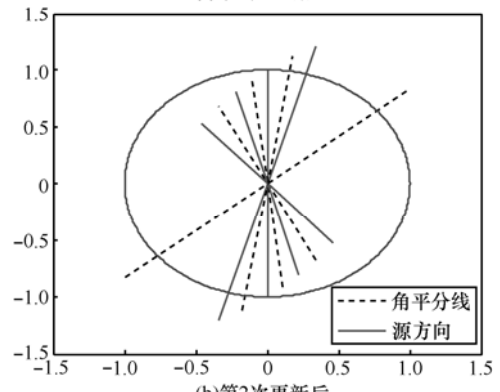
图 1 4 个源方向

观测 2 组实验中源方向的变换情况，对比图 2 和图 3 可知，因为源信号强度不同，所以更新后的源方向发生了变化，其角度变化参见表 1。

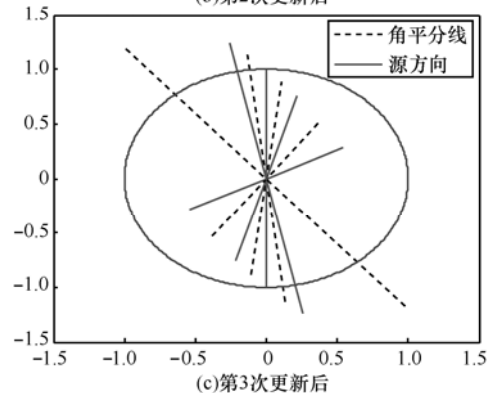
同样，对比图 4 和图 5 中信号的实部和虚部的散落图可知，源方向的变化与源信号的强度有密切关系。



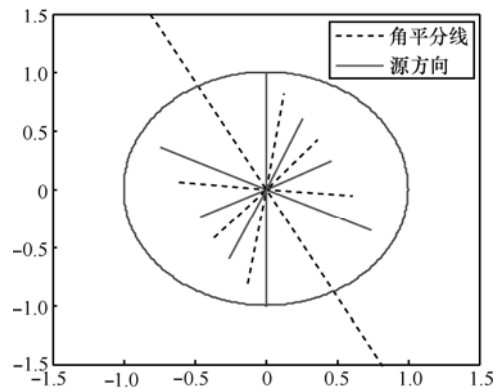
(a)第1次更新后



(b)第2次更新后



(c)第3次更新后



(d)第4次更新后

图 2 实验 1 中 4 次更新后的源方向

实验	源方向角/°			
实验1	90.0	-54.6	-12.8	23.1
	74.1	90.0	-75.0	-49.0
	27.8	73.9	90.0	-78.1
	-25.8	27.6	66.8	90.0
实验2	90.0	-60.8	-31.3	2.6
	71.8	90.0	-76.7	-58.5
	43.6	75.6	90.0	-77.0
	-2.6	43.8	70.2	90.0

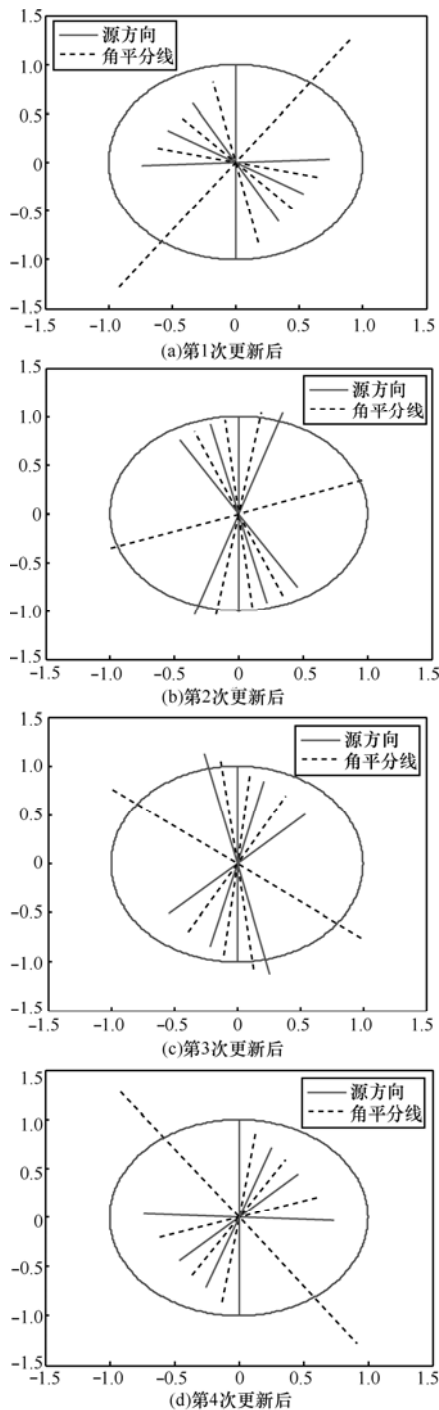


图3 实验2中4次更新后的源方向

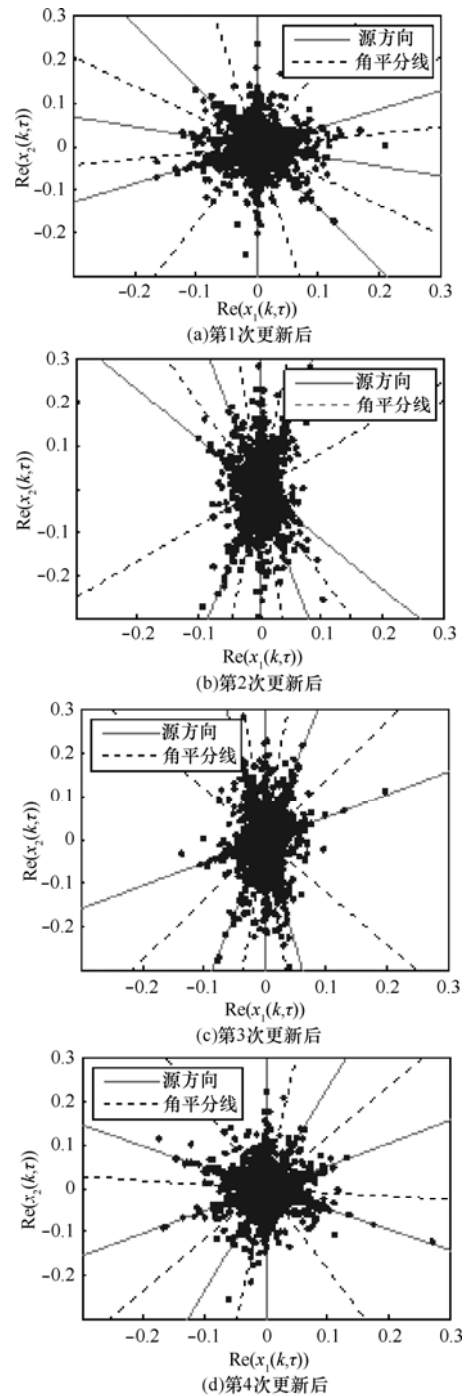


图4 实验1中4次更新后的源方向和散点图(Re表示复数的实部)

在图4中,散落点沿4个源方向较均匀分布;在图5中,散落点主要集中在第1、4个源方向附近。

在文献[10]中,不完全稀疏性的盲提取算法,仅依赖自己的源方向,在本文中,源提取的前提是在混叠矩阵已经被估计。

经上述变换更新混叠信号和混叠矩阵,最后还需要经时频掩码方法逐一提取源信号。下面引入二进制时频掩码方法提取源信号的方法。

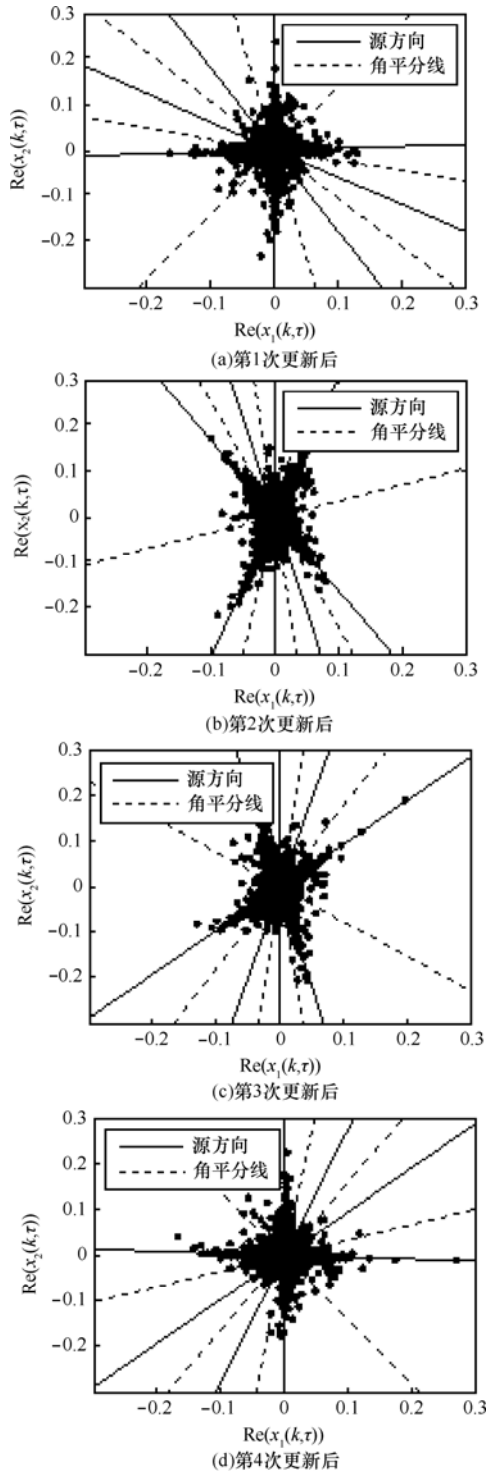


图 5 实验 2 中 4 次更新后的源方向和散落图

3 经时频掩码的盲提取

本节介绍二进制时频掩码盲提取方法，其时频掩码方法的详细理论参见文献[5]。

在时频域中，其混叠模型为

$$\mathbf{X}(k, \tau) = \mathbf{A}\mathbf{S}(k, \tau) \quad (16)$$

其中， $\mathbf{X}(k, \tau)$ 是在时频域更新后的混叠信号， $\mathbf{S}(k, \tau)$ 是在时频域的源信号，更新后的混叠矩阵的第 j 个源方向为 $\mathbf{a}_j = [0 \ 1]^T$ 。如果将混叠矩阵 \mathbf{A} 以列 \mathbf{a}_i 表示，式 (16) 可为

$$\mathbf{X}(k, \tau) = \sum_{i=1}^n \mathbf{a}_i S_i(k, \tau) \quad (17)$$

其中， $\mathbf{a}_i = [\cos \phi_i \ \sin \phi_i]^T$ ， $S_i(k, \tau)$ 是 $\mathbf{S}(k, \tau)$ 的第 i 个元素。

信号在时频域的稀疏性含义：在很多时频点上，仅有一个源信号非零，其他源信号为 0 或较小，稀疏性也称为不重叠性。

根据经时频掩码解混的 DUET 算法[5]，源信号必须是不重叠或近似不重叠，即在任意时频点 (k, τ) ，仅仅存在一个源信号是非零，其他源是零或很小。假定第 j 个源在时频点 (k, τ) 上满足该条件，则从式 (17) 可得

$$\mathbf{X}(k, \tau) = \mathbf{a}_j S_j(k, \tau) \quad (18)$$

于是第 j 个源为

$$S_j(k, \tau) = \mathbf{a}_j^T \mathbf{Y}(k, \tau) = Y_2(k, \tau) \quad (19)$$

从式 (19) 可知，DUET 算法中源的估计为接收信号矢量在源方向的投影。

对于非完全稀疏的情况，在一些时频点上，存在 2 个或多个源信号是非零，则混叠信号矢量与源方向不一致，仅仅是靠近源方向。此时，DUET 算法先检查每个时频点的混叠信号矢量最靠近哪一个源方向，以确定哪一个源信号为非零。

确定源信号的时频掩码是采用混叠信号矢量在每个源方向的投影。设在 \mathbf{a}_j 上投影值最大的时频点的集合 $\Omega_j = \{(k, \tau) \mid \|\mathbf{X}(k, \tau)^T \mathbf{a}_j\| \geq \|\mathbf{X}(k, \tau)^T \mathbf{a}_i\|, \forall i \neq j\}$ ，即 $\Omega_j = \{(k, \tau) \mid |X_2(k, \tau)| \geq |\mathbf{X}(k, \tau)^T \mathbf{a}_i|, \forall i \neq j\}$ ，其中符号 $|\cdot|$ 表示复数的模。因此，确定第 j 个源信号的时频掩码：

$$M_j(k, \tau) = \begin{cases} 1, & (k, \tau) \in \Omega_j \\ 0, & (k, \tau) \notin \Omega_j \end{cases} \quad (20)$$

源信号的估计：

$$S_j(k, \tau) = X_2(k, \tau) M_j(k, \tau) \quad (21)$$

则第 j 个提取源的估计：

$$\hat{S}_j(k, \tau) = \begin{cases} X_2(k, \tau), & (k, \tau) \in \Omega_j \\ 0, & (k, \tau) \notin \Omega_j \end{cases} \quad (22)$$

式中 $\hat{S}_j(k, \tau)$ 是第 j 个提取源信号, 经傅立叶逆变换后得到时域中第 j 个提取源信号。

该算法是以计算提取矢量和确立时频掩码方法为核心, 故称之为经时频掩码的盲提取 (BE-TFMask, blind extraction via time-frequency mask)。BE-TFMask 算法概括如下:

1) 估计混叠矩阵;

2) for $j=1:n$

按式 (3) 和式 (12) 计算提取源的法矢量 \mathbf{b}_j 和提取矢量 \mathbf{w}_j ;

按式 (14) 和式 (15), 更新混叠信号和混叠矩阵;

按式 (20), 确定提取源的时频掩码的集合 Ω_j ;

按式 (22), 提取第 j 个源信号。

end

4 实验与结果

4.1 性能评价指标

源信号估计性能的评价采用 E. Vincent 所提出的方法。该方法已经作为 SiSEC2010 年语音分离的评价方法^[11-13]。E. Vincent 将估计信号 $\hat{s}_j(t)$ 与源信号 $s_j(t)$ 的误差投影成了目标成分 $e_j^{\text{target}}(t)$ 、干扰成分 $e_i^{\text{interf}}(t)$ 和人造成成分 $e_j^{\text{artif}}(t)$ ^[11], 即

$$\hat{s}_j(t) - s_j(t) = e_j^{\text{target}}(t) + e_i^{\text{interf}}(t) + e_j^{\text{artif}}(t) \quad (23)$$

并利用最小方差投影设计一个 FIR 滤波器 (详见文献^[11,12]), 得到信号与失真的比率 (SDR, signal to distortion ratio)、信号与干扰的比率 (SIR, signal to interference ratio) 和信号与人造成分的比率 (SAR, signal to artifacts ratio), 即

$$SDR_j = 10 \lg \frac{\sum_t |s_j(t)|^2}{\sum_t |s_j(t) - \hat{s}_j(t)|^2} \quad (24)$$

$$SIR_j = 10 \lg \frac{\sum_t |s_j(t) + e_j^{\text{target}}(t)|^2}{\sum_t |e_j^{\text{interf}}(t)|^2} \quad (25)$$

$$SAR_j = 10 \lg \frac{|s_j(t) + e_j^{\text{target}}(t) + e_i^{\text{interf}}(t)|^2}{|e_j^{\text{artif}}(t)|^2} \quad (26)$$

在实验中, 直接调用 SiSEC2008 提供的 MATLAB 函数 `bss_eval_sources.m`。

4.2 实验 1

源信号 (4 个女声语音、4 男声语音信号) 和混叠矩阵都来自 SiSEC2008, 混叠矩阵为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.93969 & 0.76604 & 0.60876 & 0.38268 \\ 0.34202 & 0.64279 & 0.79335 & 0.92388 \end{bmatrix}$$

源方向角度分别为 70° 、 50° 、 37.5° 和 22.5° 。在混叠矩阵的估计中, 实验使用 MRISSI 算法^[7], 混叠矩阵估计的角度偏差分别为 0.017° 、 0.015° 、 0.211° 和 0.121° 。

在源信号的估计中, 实验进行了 DUET 和 BE-TFMask 算法仿真, 其性能指标列于表 2 中。从表 2 的结果可知, BE-TFMask 算法的 SDR 和 SAR 2 项指标有明显的改进, 表明 BE-TFMask 算法的性能果优于 DUET 算法。

4.3 实验 2

本节中的源信号和混叠矩阵与实验 1 中相同, 混叠信号的波形如图 6 所示, 源信号与估计信号的波形如图 7 所示。

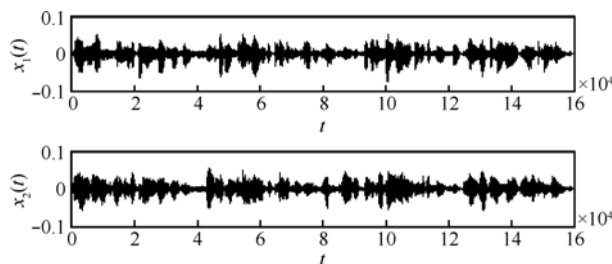


图 6 混叠信号波形

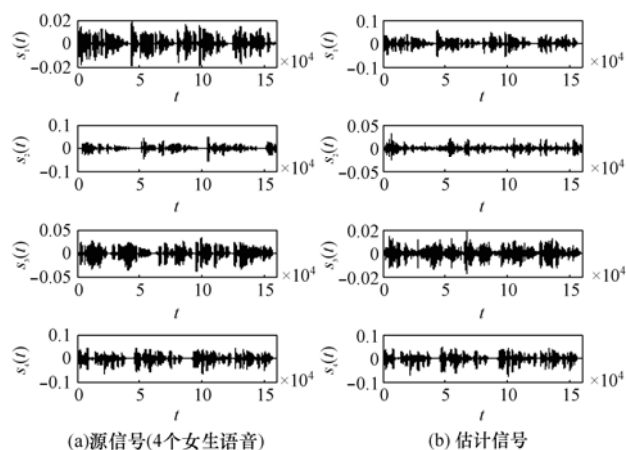


图 7 源信号与估计信号波形

在混叠信号中, 第 2、3 个源信号的幅度缩小为原幅度的 0.3 倍。混叠矩阵的估计采用 MRISSI 算法^[7], 它的角度偏差分别为 0.133° 、 0.073° 、 0.034° 和 0.078° 。

表 2 在实验 1 中 DUET 和 BE-TFMask 算法的 SDR、SIR 和 SAR

信号	算法	SDR/dB				SIR/dB				SAR/dB			
女声	DUET	8.1	4.9	5.1	8.3	21.8	11.4	13.2	21.2	8.3	6.3	6.0	8.5
	BE-TFMask	10.7	5.2	5.3	9.7	20.4	11.9	13.7	18.7	11.3	6.5	6.2	10.4
男声	DUET	6.5	2.8	3.2	6.7	18.7	9.3	9.4	19.3	6.8	4.4	4.7	7.0
	BE-TFMask	8.9	2.9	3.1	8.1	17.5	9.7	9.0	16.7	9.6	4.4	4.9	8.9

表 3 在实验 2 中的 DUET 和 BE-TFMask 算法的 SDR、SIR 和 SAR

信号	算法	SDR/dB				SIR/dB				SAR/dB			
女声	DUET	11.0	-2.0	-2.2	11.3	24.4	4.6	6.1	23.3	11.2	0.4	-0.5	11.6
	BE-TFMask	14.4	-1.7	-1.9	13.2	26.4	5.1	6.6	23.5	14.7	0.5	-0.4	13.6
男声	DUET	9.9	-4.9	-4.4	9.9	21.8	2.4	2.3	21.8	10.2	-2.0	-1.3	10.2
	BE-TFMask	12.4	-4.5	-4.0	11.6	22.0	3.3	2.7	21.4	12.9	-2.0	-1.2	12.1

在源信号的估计中, 实验进行 DUET 和 BE-TFMask 算法仿真, 其性能指标列在表 3 中。从表 3 的结果可知, 在 SDR 和 SAR 2 项指标有明显的改进, 它表明 BE-TFMask 算法的性能优于 DUET 算法, 也体现了 BE-TFMask 算法在源信号不等幅度的情况下有更优越的性能。

5 结束语

本文讨论了非完全稀疏信号的源恢复问题, 提出了一个基于时频掩码的盲提取算法。算法吸取了盲提取算法和时频掩码的优点, 用线性变换更新了混叠信号和混叠矩阵, 改进了盲提取算法和时频掩码方法。实验仿真的结果证实了 BE-TFMask 算法的性能和实用性。

参考文献:

- [1] LEE T W, LEWICKI M S, GIROLAMI M, *et al.* Blind source separation of more sources than mixtures using overcomplete representations[J]. IEEE Signal Processing Letter, 1999,6(4): 87-90.
- [2] ZIBULEVSKY M, PEARLMUTTER B A. Blind source separation by sparse decomposition in a signal dictionary[J]. Neural Computation, 2001,13(4): 863-882.
- [3] BOFILL P, ZIBULEVSKY M. Underdetermined blind source separation using sparse representations[J]. Signal Processing, 2001, 81(11): 2353-2362.

- [4] DELGADO K K, MURRAY J F, ENGAN K, *et al.* Dictionary learning algorithms for sparse representation[J]. Neural Computation, 2003, 15(2): 349-396.
- [5] YILMAZ O, RICKARD S. Blind separation of speech mixtures via time-frequency masking[J]. IEEE Tran on Signal Processing, 2004, 52(7):1830-1847.
- [6] ABRARD F, DEVILLE Y A. Time-frequency blind signal separation method applicable to underdetermined mixtures of dependent sources[J]. Signal Processing, 2005, 85(7):1389-1403.
- [7] 肖明, 谢胜利, 傅予力. 基于频域单源区间的具有延迟的欠定盲分离[J]. 电子学报, 2007, 35(12): 2279-2283.
XIAO M, XIE S L, FU Y L. Underdetermined blind delayed source separation based on single source intervals in frequency domain[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(12): 2279-2283.
- [8] VINCENT E. Complex nonconvex LP norm minimization for underdetermined source separation[A]. Proc Int Conf on Independent Component Analysis and Blind Source Separation (ICA)[C]. Madrid, Spain, 2007.430-437.
- [9] LI Y, AMARI S, CICHOCKI A, *et al.* Underdetermined blind source separation based on sparse representation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(2): 423-437.
- [10] 谢胜利, 孙功宪, 肖明等. 欠定和非完全稀疏性的盲信号提取[J]. 电子学报, 2010, 38 (5): 1028-1031.
XIE S L, SUN G X, XIAO M, *et al.* Underdetermined and incompletely sparse blind signal extraction[J]. Acta Electronica Sinica,

2010, 38 (5): 1028-1031.

[11] VINCENT E, ARAKI S, BOFILL P. The 2008 signal separation evaluation campaign: a community-based approach to large-scale evaluation[A]. Proc ICA[C]. Paraty, Brazil, 2009. 734-741.

[12] EMIYA V, VINCENT E, HARLANDER N, *et al.* Subjective and objective quality assessment of audio source separation[J]. IEEE Trans on Audio, Speech and Language Processing. 2011, 19(7): 2046-2057.

[13] SHOKO A, ALEXEY O, VIKRHAM G. The 2010 signal separation evaluation campaign (SiSEC2010): audio source separation[A]. Proc ICA Latent Variable Analysis and Signal Separation[C]. Saint-Malo Cedex, France, 2010. 114-122.

作者简介:



肖明 (1968-), 男, 四川南部人, 博士, 广东石油化工学院高级实验师, 主要研究方向为智能信息处理、盲信号分离、稀疏成分分析等。



高峰 (1975-), 男, 重庆人, 华南理工大学博士生, 主要研究方向为盲信号处理、卫星导航技术和基于北斗 2/GPS 双模系统的核心基带芯片的设计。



孙功宪 (1973-), 男, 安徽巢湖人, 华南理工大学博士生, 主要研究方向为卫星导航、智能信息处理、盲信号分离、稀疏成分分析等。



谢胜利 (1958-), 男, 湖北公安人, 华南理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为物联网技术、数字家庭网络结构、RFID 理论与技术、盲信号分离和图像处理等。

(上接第 76 页)

MOBICOM'08[C]. San Francisco, USA, 2008. 339-350.

[12] WEBER S, ANDREWS J, YANG X, *et al.* Transmission capacity of wireless ad hoc networks with successive interference cancellation[J]. IEEE Trans Information Theory, 2007, 53(8): 2799-2814.

[13] NS-2, Network simulator version 2[EB/OL]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> [EB/OL]. 2010.

作者简介:



吕绍和 (1982-), 男, 湖南永州人, 博士, 国防科技大学计算机学院助理研究员, 主要研究方向为资源调度、MAC 协议设计与可见光网络等。



王晓东 (1973-), 男, 湖南长沙人, 博士, 国防科技大学计算机学院研究员, 主要研究方向为无线网络、社会网络与认知网络等。



周兴铭 (1938-), 男, 浙江余姚人, 国防科技大学计算机学院教授, 中国科学院院士, 主要研究方向为高性能计算、无线网络与移动计算等。