

旋转变换和欠定盲分离的 DUET 算法

高峰^{1,3}, 肖明², 孙功宪^{1,4}, 谢胜利¹

(1. 华南理工大学电子与信息学院, 广东广州 510640; 2. 广东省石化装备故障诊断重点实验室, 广东茂名 525000;
3. 东莞泰斗微电子科技有限公司, 广东东莞 523808; 4. 深圳同洲电子股份有限公司, 广东深圳 518057)

摘要: DUET 是采用时频掩码求解欠定问题的著名算法. 本文讨论旋转变换对 DUET 算法的影响, 提出了一个改进的 DUET 算法. 该算法利用混叠矩阵的任意两列作为旋转矩阵, 先旋转接收信号和混叠矩阵, 后执行 DUET 算法. 因为 DUET 算法在不同的旋转变换下有不同的结果, 所以需要将这此结果相加, 以弥补 DUET 算法的失真. 最后, 几个语音信号实验结果显示算法的性能和实用.

关键词: 欠定盲分离; 稀疏成分分析; 不重叠; 时频掩码; l_0 范数

中图分类号: TN911 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2012)06-1121-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.06.009

Rotation Transform and DEUT in Underdetermined Blind Source Separation

GAO Feng^{1,3}, XIAO Ming², SUN Gong-xian^{1,4}, XIE Sheng-li¹

(1. School of Electrics & Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;
2. Key Lab of Fault Diagnosis for Petrochemical Equipment of Guangdong, Maoming, Guangdong 525000, China;
3. Dongguan TECHTOP Microelectronics Technology Company Limited, Dongguan, Guangdong 523808, China;
4. Shenzhen COSHIP Electronics Company Limited, Shenzhen, Guangdong 518057, China)

Abstract: DUET is a famous algorithm to resolve underdetermined problem using time frequency mask. Effect on rotation transform on DUET is discussed and an improved DUET algorithm is proposed in this paper. The algorithm rotates the mixtures and mixing matrix using the rotation matrix, which is formed by any two columns in the mixing matrix, and then do DUET algorithm. Because the results are different in DUET algorithms under different rotations, the algorithm sums the results to improve the distortion. Finally, several speech signal experiments demonstrate its performance and practice.

Key words: underdetermined blind source separation; sparse component analysis; disjointness; time frequency mask; l_0 -norm

1 引言

欠定的盲信号分离 (Underdetermined Blind Source Separation, UBSS) 的接收信号个数少于源信号个数, 基于稀疏表示的两步法策略是解决欠定问题的基本方法^[1~8]. 两步法的第一步是矩阵的恢复, 第二步是源的恢复. 在矩阵的恢复中, 最具有代表性的有 DUET^[5]、TIFROM^[6]和 MARISS (或 SABM 算法)^[7,8]. 在源的恢复中, 有最短路径法、 l_1 -范数解^[9]、 l_0 -范数解^[10]和利用时频掩码的 DUET 算法^[5].

在欠定盲分离中, 源的恢复也一直是一个挑战. DUET 算法利用时频掩码的源信号估计算法, 是欠定盲分离中最著名的方法之一^[5]. 然而, DUET 算法要求源信号相互有一个不重叠的稀疏表示, 在大多数的接收信号

中, 源信号不能满足其条件, 仅仅有近似的重叠的稀疏表示, 所以, 不重叠的数据点越多, DUET 算法的效果就越差.

本文针对 DUET 算法的不足, 利用旋转变换来改善源信号的恢复性能, 提出了一个改进的 DUET 算法. 算法采用一系列的旋转变换, 改变混叠矩阵和接收信号, 后再执行时频掩码的 DUET 算法. 最后几个语音信号实验将用来验证算法的性能和实用性.

2 DUET 算法

在没有噪声和回波的情况下, n 维接收信号矢量 $\mathbf{x}(t)$ 通常为

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

式中 \mathbf{A} 是欠定的混叠矩阵, $\mathbf{s}(t)$ 是 m 维源信号矢量.

当仅有两个接收信号($n=2$)的时候,设混叠矩阵为:

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

其中,混叠矩阵的列矢量方向称为信号的源方向,其角度 θ_k 表示第 k 个源方向的方向角。

在欠定盲信号分离中,信号通常在时频域中较为稀疏,故接收信号经短时加窗的傅立叶变换后,将得到其稀疏表示.式(1)可为:

$$\mathbf{X}(k, \tau) = \mathbf{A}\mathbf{S}(k, \tau) \quad (2)$$

式中 $\mathbf{X}(k, \tau)$ 表示在时频域中的接收信号, $\mathbf{S}(k, \tau)$ 表示在时频域的源信号。

将矩阵 \mathbf{A} 按列 \mathbf{a}_j 展开,式(2)写作:

$$\mathbf{X}(k, \tau) = \sum_{j=1}^n \mathbf{a}_j S_j(k, \tau) \quad (3)$$

其中 $\mathbf{a}_j = [\cos\theta_j \ \sin\theta_j]^T$, $[\cdot]^T$ 表示矩阵的转置, $\mathbf{S}(k, \tau)$ 的第 j 个元素 $S_j(k, \tau)$ 是第 j 个源信号。

根据 DUET 算法^[5]的要求,源信号必须是不重叠或近似不重叠,即在任意时频点(k, τ),仅仅存在一个非零源,而其它源为零或近似很小.假定第 j 个源在一个时频点(k, τ)满足该条件,则从式(3)可知,

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k, \tau) &= \mathbf{a}_j S_j(k, \tau) \\ S_j(k, \tau) &= \mathbf{a}_j^T \mathbf{X}(k, \tau) \end{aligned} \quad (4)$$

从式(4)可知,DUET 算法中源的估计为接收信号矢量在源方向的投影。

DUET 算法的关键:确定每个时频点上的接收信号矢量最靠近哪一个源方向,我们称之为“归属”,即归属于哪一个源信号.确定归属的方法是取接收信号矢量向每个源方向投影最大者.确定其归属后,按照式(4)可估计出源信号.因为接收信号在时频域的散落图上经常远离了源方向直线,所以估计信号存在一些偏差,需要确定其归属。

角平分线是确定接收信号矢量归属的标志线.在几何上,相邻两个源方向之间的接收信号矢量的归属,可用两个源方向的角平分线来划分.在角平分线和源方向 $\tilde{\mathbf{a}}_j$ 的散落点,其归属为第 j 个源信号;在角平分线和源方向 $\tilde{\mathbf{a}}_i$ 的散落点,其归属为第 i 个源信号。

根据文献^[5],DUET 算法简要概括如下:

步骤 1 对信号进行短时傅立叶变换 $\mathbf{X}(k, \tau)$ 。

步骤 2 给定时频点(k, τ),计算 $\mathbf{X}(k, \tau)$ 在每个源方向的投影,确定其模最长的源方向,则该源确定为非零,其它源信号确定为零。

步骤 3 按照式(4),估计源信号,并转换到时域。

3 旋转变换

在欠定的盲分离中,混叠矩阵的估计可用聚类算

法,也可用单源数据的估计算法,在此不再赘述,请参考文献^[7,8]。

因为 DUET 算法是将每个时频点的接收信号近似地确定为单源数据点,所以恢复信号必然存在偏差.下面将讨论混叠矩阵对 DUET 算法的影响。

在图 1(a)中,给定任意两个源方向矢量 \mathbf{a}_i 和 \mathbf{a}_j ,假定接收信号为矢量 \overrightarrow{OA} ,它是第 i 和第 j 个源信号的混叠,其它源信号为零,即 $\overrightarrow{OA} = \mathbf{a}_i S_i(k, \tau) + \mathbf{a}_j S_j(k, \tau)$,则第 i 和第 j 个源信号的大小应为 \overrightarrow{OC} 和 \overrightarrow{OD} 的长度.然而,根据 DUET 算法,信号矢量 \overrightarrow{OA} 最靠近的源方向 \mathbf{a}_j (它在 \mathbf{a}_j 上投影最大),此时,第 j 个源信号的估计值为 \overrightarrow{OB} 的长度.它明显大于 \overrightarrow{OD} 的长度,所以,此时 DUET 估计存在干扰,同时它把小信号近似为零,第 i 个源信号被置为零.综上,DUET 估计近似不重叠源信号时存在一定缺陷。

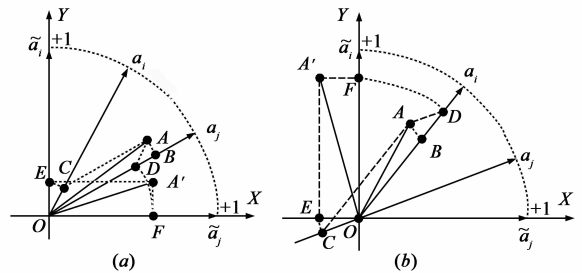


图1 旋转变换和矢量分解

为此,本文将对源方向和接收信号进行旋转,旋转后再进行 DUET 算法,提出 DUET 的改进算法。

旋转变换是采用可逆矩阵乘混叠矩阵和接收信号矢量,旨在改变源方向和接收信号矢量的散落发布.选任意两个源方向(第 i 和第 j 个源信号)构成一子矩阵

\mathbf{A}_{ij} ,即 $\mathbf{A}_{ij} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & \cos\theta_j \\ \sin\theta_i & \sin\theta_j \end{bmatrix}$,再用 \mathbf{A}_{ij}^{-1} 作为旋转矩阵,即

$$\mathbf{A}_{ij}^{-1} = \frac{1}{\sin(\theta_j - \theta_i)} \begin{bmatrix} \sin\theta_j & -\cos\theta_j \\ -\sin\theta_i & \cos\theta_i \end{bmatrix}$$

在图 1 中,两个源方向 \mathbf{a}_i 和 \mathbf{a}_j 被旋转到横轴和纵轴两个方向 $\tilde{\mathbf{a}}_i$ 和 $\tilde{\mathbf{a}}_j$,相应的 \overrightarrow{OC} 和 \overrightarrow{OD} 旋转到了 \overrightarrow{OE} 和 \overrightarrow{OF} ,由于 $\overrightarrow{OA} = \overrightarrow{OC} + \overrightarrow{OD}$,所以 \overrightarrow{OA} 旋转到了 $\overrightarrow{OA'}$,即 $\overrightarrow{OA'} = \overrightarrow{OE} + \overrightarrow{OF}$, $\overrightarrow{OA'}$ 就是旋转后接收信号矢量.在旋转变换后,据 DUET 算法,第 j 个源的估计为 \overrightarrow{OF} 的长度,等于 \overrightarrow{OD} 的长度,此时,经过旋转变换,可以改变了图 1(a)中的缺陷。

要注意的是,在时频点(k, τ)上,如果有两个源信号混叠,但并不能确定是哪两个源信号,所以,选哪两列作为旋转矩阵是一个难点。

用旋转矩阵乘以接收信号,可得:

$$\tilde{\mathbf{X}}(k, \tau) = \mathbf{A}_{ij}^{-1} \mathbf{X}(k, \tau) \quad (5)$$

将表达式(3)代入式(5),并设 $\mathbf{B}_{ij} = \mathbf{A}_{ij}^{-1} \mathbf{A}$ 和 $\mathbf{B}_{ij} =$

$[\mathbf{b}_1 \ \mathbf{b}_2 \ \cdots \ \mathbf{b}_m]$, 则

$$\tilde{\mathbf{X}}(k, \tau) = \sum_{j=1}^m \mathbf{b}_j S_j(k, \tau) \quad (6)$$

其中 $\mathbf{b}_l = \mathbf{A}_{ij}^{-1} \mathbf{a}_l$ ($l = 1, 2, \dots, m$). 将 \mathbf{A}_{ij}^{-1} 代入 \mathbf{b}_l , 化简: \mathbf{b}_l

$$= \frac{1}{\sin(\theta_j - \theta_l)} \begin{bmatrix} \sin(\theta_j - \theta_l) \\ \sin(\theta_l - \theta_i) \end{bmatrix}$$

令 $\tilde{\mathbf{a}}_l = [\cos \phi_l \ \sin \phi_l]^T$ 为 \mathbf{b}_l 的归一化矢量, 即 $\mathbf{b}_l =$

$$r_l \tilde{\mathbf{a}}_l, \text{ 其中, } \phi_l = \tan^{-1} \frac{\sin(\theta_l - \theta_i)}{\sin(\theta_j - \theta_l)},$$

$$r_l = \frac{\sqrt{\sin^2(\theta_j - \theta_l) + \sin^2(\theta_i - \theta_l)}}{|\sin(\theta_j - \theta_l)|}.$$

方程式(6)可写成欠定的盲分离的标准形式:

$$\tilde{\mathbf{X}}(k, \tau) = \sum_{l=1}^m \tilde{\mathbf{a}}_l \tilde{S}_l(k, \tau) \quad (7)$$

其中, 新的接收信号为 $\tilde{\mathbf{X}}(k, \tau)$, 其新的混叠矩阵为

$\tilde{\mathbf{A}} = [\tilde{\mathbf{a}}_1 \ \tilde{\mathbf{a}}_2 \ \cdots \ \tilde{\mathbf{a}}_m]$, 即

$$\tilde{\mathbf{a}} = \begin{bmatrix} \cos \phi_1 & \cos \phi_2 & \cdots & \cos \phi_m \\ \sin \phi_1 & \sin \phi_2 & \cdots & \sin \phi_m \end{bmatrix}. \text{ 此时, 每个源信号的源}$$

方向发生了变化, 而且源信号的幅度也随之改变:

$$\tilde{S}_l(k, \tau) = r_l S_l(k, \tau) \quad (8)$$

其中, r_l 可大于 1, 也可小于 1, 只有当 $l = i, j$ 时 $r_l = 1$.

在新接收信号中, 如果 $r_l > 1$ 时, 则第 l 个源信号被放大. 如果 $r_l < 1$, 第 l 个源信号被缩小.

在图 1(a) 中, 矢量 \vec{OA} 被旋转到 \vec{OA}' , 矢量的长度缩小. 在图 1(b) 中, 矢量 \vec{OA} 被旋转到 \vec{OA}' , 矢量的长度增长. 由此可类推 r_l 何时缩短和增长.

图 1 中, 当 $|\theta_j - \theta_l| < 90^\circ$ 时, 如果第 l 个信号的源方向位于它们之间, 则 $r_l < 1$; 如果第 l 个源信号的源方向位于它们之外, 则 $r_l > 1$. 当 $|\theta_j - \theta_l| > 90^\circ$ 时, 如果第 l 个源信号的源方向位于它们之间, 则 $r_l > 1$; 如果第 l 个源信号的源方向位于它们之外, 则 $r_l < 1$.

系数 r_l 的大小对 DUET 算法的信噪比有重要的影响, 是改善 DUET 算法第一个重要原因. 如果旋转变换使得第 l 个源信号的幅度增强, 那么该源信号的信噪比将明显提高. 如果旋转变换使得第 l 个源信号的幅度减小, 那么该源信号的信噪比将不会显提高, 有时可能出现更多的干扰.

旋转变换对平面上接收信号矢量的归属有重大的影响, 特别是在相邻两个源方向的角平分线附近的接收信号矢量, 下面进行举例分析说明.

按 SiSEC2008 提供的混叠矩阵^[11], 源方向分别为 $70^\circ, 50^\circ, 37.5^\circ$ 和 22.5° . 确定接收信号矢量归属的标志的角平分线角度见表 1, 分别是 $60^\circ, 43.8^\circ, 30.0^\circ$ 和 -53.8° . 在表 1 中, 按照混叠矩阵的任意两列作为旋转矩阵, 旋转源方向和角平分线, 形成新的源方向 ϕ 和被

旋转的角平分线的方向角度为 $\tilde{\beta}$, 新源方向的角平分线 β , 对角平分线的变化, 旋转变换对其影响较大, 在表 1 中的角平分线变化最大相差 18.2° . 当原角平分线不再是新源方向的角平分线时, 部分接收信号矢量的归属将发生变化, 这是旋转变换影响 DUET 算法的第二个重要原因.

表 1 源方向和角平分线的角度($^\circ$)

旋转矩阵	源方向和其角平分线的角度				
	源方向 θ	70.0	50	37.5	22.5
未旋转	角平分线 β	60.0	43.8	30.0	-53.8
	新源方向 ϕ	90.0	0.0	-21.9	-32.1
第 2,1 列	角平分线 β	45.0	-11.0	-27.0	-61.0
	角度 $\tilde{\beta}$	45.0	-13.8	-28.0	-47.5
	新源方向 ϕ	90.0	32.3	0.0	-19.3
第 3,1 列	角平分线	61.2	16.2	-9.7	-54.7
	角度 $\tilde{\beta}$	65.6	13.8	-11.5	-47.2
	新源方向 ϕ	90.0	53.5	25.7	0.0
第 4,1 列	角平分线 β	71.7	39.6	12.9	-45.0
	角度 $\tilde{\beta}$	74.1	39.3	11.5	-45.0
	新源方向 ϕ	-57.5	90.0	0.0	-29.3
第 3,2 列	角平分线 β	-83.8	45.0	-14.6	-43.4
	角度 $\tilde{\beta}$	-65.6	45.0	-20.9	-44.7
	新源方向 ϕ	-65.1	90.0	50.1	0.0
第 4,2 列	角平分线 β	-77.6	70.0	25.0	-32.6
	角度 $\tilde{\beta}$	-74.1	73.3	20.9	-42.5
	新源方向 ϕ	-53.9	-64.9	90.0	-0.0
第 4,3 列	角平分线 β	-59.4	-77.4	45.0	-27.0
	角度 $\tilde{\beta}$	-57.8	-73.3	45.0	-42.8

综上所述, 旋转变换对 DUET 算法的影响主要有两个方面. 一方面, 可以放大或缩小参加混叠的源信号. 另一方面, 改变部分接收信号矢量的归属, 从而影响源信号的恢复性能.

虽然旋转变换对 DUET 算法有明显的影响, 但对于 l_1 范数和 l_0 范数, 因为是求解线性方程, 所以线性变换不会影响它们的估计结果.

4 DUET 改进算法

前面分析了旋转矩阵对 DUET 算法的影响. 在不同的旋转下恢复的源信号不同, 每个旋转变换仅仅有利于部分源信号的恢复, 没有一个旋转变换可得到最优解, 源方向如果能够较均匀地分布在坐标平面上, DUET 算法的分离结果就较好, 在实验 2 中可以看到这一点.

因为信号混叠的不确定性, 在实际的信号混叠中, 源信号的源方向比较靠近, 通过旋转变换后, 信号在平面上将比较均匀的分开, 所以能够达到改善信号的目的.

为了能够弥补 DUET 算法对信号的削减, 我们采用对各种旋转变换下的源信号估计进行叠加的策略. 该

算法称为改进的 DUET 算法 (Improved DUET; Imp-DUET), 具体如下:

步骤 1 对信号做短时加窗的傅立叶变换.

步骤 2 估计混叠矩阵.

步骤 3 按照混叠矩阵的每两个列矢量进行旋转, 计算新的接收信号、新的混叠矩阵.

步骤 4 新的接收信号和混叠矩阵执行 DUET 算法, 估计各种旋转变换下的源信号.

步骤 5 将在各种旋转变换下估计的源信号进行叠加, 得到源信号的估计.

5 仿真实验

本节将以 4 个女声语音信号和 4 个男声语音信号作为源信号进行两组实验, 实验分别进行 DUET 算法、DUET 改进算法和 l_0 算法的仿真, 并进行性能比较.

源信号估计的评价性能指标采用 E. Vincent 提出的方法, 该方法作为 SiSEC2010 年语音分离的评价方法^[11~13].

在 SiSEC2008, E. Vincent 将信号 $\hat{s}_j(t)$ 与源 $s_j(t)$ 的误差投影分成目标成分 $e_j^{\text{target}}(t)$ 、干扰成分 $e_j^{\text{interf}}(t)$ 和人为成分 $e_j^{\text{artif}}(t)$ ^[12], $\hat{s}_j(t) - s_j(t) = e_j^{\text{target}}(t) + e_j^{\text{interf}}(t) + e_j^{\text{artif}}(t)$.

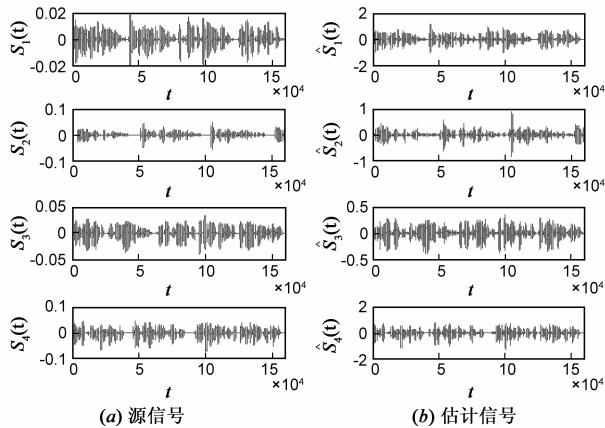


图2 源信号和估计信号的波形

为完成上述分解, 利用最小方差投影设计了 FIR 滤波器, 详见文献^[11, 12]. 该方法采用信号与失真的比率 (Signal to Distortion Ratio; SDR)、信号与干扰的比率 (Signal to Interference Ratio; SIR), 信号与人造成分的比率 (Signal to Artifacts Ratio; SAR) 三个指标全面地衡量分离信号的性能, 即:

$$\text{SDR}_j = 10 \log_{10} \frac{\sum_t |s_j(t)|^2}{\sum_t |s_j(t) - \hat{s}_j(t)|^2}$$

$$\text{SIR}_j = 10 \log_{10} \frac{\sum_t |s_j(t) + e_j^{\text{target}}(t)|^2}{\sum_t |e_j^{\text{interf}}(t)|^2}$$

$$\text{SAR}_j = 10 \log_{10} \frac{\sum_t |s_j(t) + e_j^{\text{target}}(t) + e_j^{\text{interf}}(t)|^2}{\sum_t |e_j^{\text{artif}}(t)|^2}$$

在仿真实验中, 直接使用 Matlab 函数 `bss_eval_sources.m`, 它来自 SiSEC2008^[11].

实验 1 源信号 (4 个女声语音、4 个男声语音信号) 和混叠矩阵都来自 SiSEC2008^[11], 4 个女声的波形图见图 2(a), 混叠矩阵为

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

在混叠矩阵的估计中, 实验采用 MRISSE (或 SABM) 算法^[9, 10], 混叠矩阵估计的角度偏差分别为 0.017° 、 0.0156° 、 0.2117° 和 0.1212° .

在源信号的估计中, 进行了 Imp-DUET、DUET 算法仿真法和 l_0 范数的算法仿真试验, 实验结果列在表 2 中, Imp-DUET 算法的恢复信号的波形图见图 2(b).

从表 2 知, 对比 DUET 算法, SDR 和 SAR 指标有明显提高, 对比 l_0 范数算法, SIR 指标有明显提高. 其理论上的原因: DUET 改进算法在旋转变换后, 一些时频点的归属发生了变化, 源信号的幅度较大的变化.

表 2 在实验 1 中的 l_0 范数、DUET 和 DUET 改进算法性能 (dB)

		DUET	8.1	4.9	5.1	8.3
		SDR	l_0 -norm	10.7	6.0	5.5
女声信号	SIR	DUET	21.8	11.4	13.2	21.2
		l_0 -norm	16.5	15.9	16.3	15.1
	SAR	Imp-DUET	22.1	13.1	14.2	20.1
		DUET	8.3	6.3	6.0	8.5
		l_0 -norm	12.2	6.5	5.9	10.7
		Imp-DUET	10.1	6.6	6.1	9.7
男声信号	SDR	DUET	2.2	9.1	10.9	11.2
		l_0 -norm	2.3	9.4	10.7	11.9
		Imp-DUET	2.9	9.8	11.5	11.9
	SIR	DUET	11.3	19.6	21.1	20.7
		l_0 -norm	9.8	17.2	19.1	20.1
		Imp-DUET	11.4	19.7	20.7	20.9
	SAR	DUET	3.0	9.6	11.4	11.8
		l_0 -norm	3.5	10.3	11.5	12.6
		Imp-DUET	3.8	10.3	12.1	12.5

实验结果表明: DUET 改进算法优于 DUET 算法和 l_0 范数算法.

实验 2 为分析旋转变换对 DUET 算法的影响, 设源方向为 15° 、 60° 、 105° 和 150° , 四个源方向间的夹角相等, 接收信号的散落点几乎均匀分布在整个平面上.

在 Imp-DUET 算法仿真中, 信号得到改善, 3 个指标有所提高, 性能指标参见表 3.

从表 3, 对比 DUET 算法, SDR 和 SAR 指标有明显提高; 对比 l_0 范数算法, SIR 指标有明显提高.

表 3 在实验 2 中的 l_0 范数、DUET 和 DUET 改进算法性能 (dB)

女 声 信 号	SDR	DUET	6.5	2.8	3.2	6.7
		l_0 -norm	8.2	2.7	3.1	7.0
		Imp-DUET	9.8	3.8	3.9	8.7
	SIR	DUET	18.7	9.3	9.5	19.3
		l_0 -norm	12.4	14.7	10.4	12.7
		Imp-DUET	16.8	12.0	10.8	17.0
	SAR	DUET	6.8	4.4	4.7	6.9
		l_0 -norm	10.6	3.1	4.3	8.6
		Imp-DUET	10.8	4.8	5.3	9.4
男 声 信 号	SDR	DUET	-0.7	5.7	6.8	8.6
		l_0 -norm	-1.0	5.9	7.0	9.0
		Imp-DUET	0.05	6.4	7.4	9.3
	SIR	DUET	7.3	14.3	13.9	18.2
		l_0 -norm	5.2	12.6	13.5	16.5
		Imp-DUET	7.1	14.2	14.1	18.2
	SAR	DUET	0.8	6.5	7.9	9.2
		l_0 -norm	1.4	7.2	8.2	10.0
		Imp-DUET	1.8	7.3	8.7	10.0

从实验数据可知,旋转变换对 DUET 算法影响大.因为 DUET 算法是以削减为主,所以将各个旋转变换后的估计信号叠加,相互弥补,可以取得明显的改善.

6 结论

本文讨论了欠定盲信号分离中的源恢复问题,分析了 DUET 算法在不完全稀疏条件下的不足,提出了一个 Imp-DUET 算法.算法的核心是用旋转变换改变混叠矩阵和接收信号.旋转变换能够改善 DUET 算法在于:一是可改变接收信号中源信号的幅度大小,一是可改变接收信号的归属.几个实验的仿真结果证明了 Imp-DUET 算法的性能和实用性.

参考文献

- [1] Lee T W, Lewicki M S, 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] 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, Sun G, Xiao M, et al. Underdetermined and incompletely sparse blind signal extraction [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(5): 1028 - 1031. (in Chinese)
- [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] Xiao M, XIE S, FU Y. Searching-and-averaging method of underdetermined blind speech signal separation in time domain [J]. Sci China Ser F-Inf, 2007, 50(5): 771 - 782.
- [8] 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): 37 - 41.
Xiao M, XIE S, FU Y. Underdetermined blind delayed source separation based on single Source intervals in frequency domain [J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(12): 37 - 41. (in Chinese)
- [9] Vincent E. Complex nonconvex lp norm minimization for underdetermined source separation [A]. Proc ICA2007 [C]. London, UK: Springer-Verlag, 2007. 430 - 437.
- [10] 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.
- [11] Vincent E, Araki S, Bofill P. The 2008 signal separation evaluation campaign: A community-based approach to large-scale evaluation [A]. Proc ICA2009 [C]. Paraty, Brazil: Springer-Verlag, 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, Vikram G. The 2010 signal separation evaluation campaign (SiSEC2010): Audio source separation [A]. Proc LVA/ICA 2010 [C]. Saint Malo, France: Springer-Verlag, 2010. 114 - 122.

作者简介



高峰 男, 1975 出生于重庆, 华南理工大学博士生, 高级工程师, 东莞市泰斗微电子有限公司总经理, 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.

E-mail: gaofeng@techtotop.com



肖明(通讯作者) 男, 1968 出生于四川南部县, 博士, 广东石油化工学院计算机与电子信息学院, 广东省石油化工故障诊断重点实验室高级实验师, 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.

E-mail: xiaoming1968@163.com