

噪声环境下水声信号瞬时盲源分离方法研究

姜卫东^{1,2}, 张宏滔¹, 陆佺人¹

(1. 东南大学无线电工程系, 南京 210096; 2. 海军工程大学电子工程学院, 武汉 430033)

摘要: 噪声环境下大多数盲源分离算法性能大大降低。提出了一种适用于噪声环境的基于子带分解的瞬时盲源分离算法。通过修正白化矩阵和选取合理子带降低盲源分离过程中由噪声产生的不利影响。仿真实验表明, 采用基于子带分解的瞬时盲源分离算法能够较好地实现噪声环境下水声混合信号的分离; 进一步研究表明, 该算法在噪声环境下表现出良好的稳健性。

关键词: 盲源分离; 子带分解; 水声信号; 噪声; 瞬时混合

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2006)-03-0182-05

Instantaneous blind source separation of underwater acoustics signals in a noisy background

JIANG Wei-dong^{1,2}, ZHANG Hong-tao¹, LU Ji-ren¹

(1. Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210096; 2. Institute of Electrics Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Most algorithms for blind signal separation (BSS) have poor performance in a noisy background. An instantaneous blind signal separation method based on subband decomposition is presented to deal with noisy BSS. Using a modified whitening matrix and selecting an appropriate subband, drawbacks due to background noise can be alleviated. Simulation experiments show that mixed underwater acoustic signals in noisy background can well be separated. In addition, the method is robust in the background noise of different intensities.

Key words: blind signal separation; subband decomposition; underwater acoustics signal; noise; instantaneous mixture

1 引 言

盲源分离是指从传感器接收到的混合信号中恢复出统计独立的源信号, 除信号独立性假设外, 没有系统和环境相关先验知识。由于对外界条件限制较少, 因而盲源分离方法适用性很强, 近年来在阵列信号处理、多用户通信和地震信号处理等领域

得到广泛研究和应用。

瞬时混合信号的盲源分离目前有一些比较成熟的算法, 比如基于信息论的盲源分离算法^[1,2], 基于非高斯性测度的快速定点盲源抽取算法^[3], 基于高阶累积量的盲分离算法^[4]等。但是, 在噪声环境下进行信号的盲源分离, 大多数算法的分离性能大大降低, 因而有必要研究对噪声稳健性较好的盲源分离算法。Douglas^[5]等人在 Informax 方法基础上, 建立了基于信息论的 ICA 噪声偏差消除方法, Hyvarinen^[6]建立了基于高斯矩的噪声 ICA 定点算法, 这些算法在一定的噪声背景下取得了较好的分离效果。

本文研究宽带噪声环境下水声信号瞬时盲源分

离方法, 结合水声信号频谱特性, 提出一种基于子带分解的水声信号盲源分离算法。其主要思想是利用观测信号在其某些频段上明显高于其它频段上的信噪比这一特性, 来降低噪声对信号分离的影响。同时, 通过修正盲源分离初始阶段的白化矩阵, 进一步保证噪声环境下盲源分离算法的有效性。

2 子带分解盲源分离基本原理

无噪瞬时 ICA 混合模型中, 记 $s(t)=[s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t)]^T$ 为源信号矩阵, A 为混合矩阵, $x(t)=[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ 为混合信号矩阵, 则瞬时混合模型为

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

盲源分离的目的就是从接收到的 n 个混合信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$ 中恢复出统计独立的 n 个源信号。设 W 为分离矩阵, 则

$$y(t)=Wx(t) \quad (2)$$

由式(1)、(2)得 $y(t)=WAs(t)$, 即若分离信号 $y(t)$ 是源信号 $s(t)$ 的估计信号, 在忽略幅度和排列次序不确定性影响的情况下, 全局矩阵 $C=WA$ 越接近于单位阵, 算法的分离性能越好。

考虑对混合信号 $x(t)$ 实行线性滤波, 即在混合信号 $x(t)$ 的信号频带上选取其中一部分频率信号成分。以算子 Γ 表示这种线性运算, 因 A 也是线性运算, 对式(1)运算得

$$\Gamma(x(t))=\Gamma(As(t))=A\Gamma(s(t)) \quad (3)$$

上式表明, 混合信号和源信号在其部分频段上, 混合矩阵保持不变。于是得到第一种基于子带分解的盲源分离方法: 对滤波信号 $\Gamma(x(t))$ 实施盲源分离, 找到混合矩阵 A 的逆矩阵 W , 再利用式(2)得到分离信号。盲源分离基本条件要求原始信号之间互相统计独立。Tanaka^[7]指出, 基于子带分解的盲源分离方法, 将这种基本要求放宽到只要在某个子带上原始信号为统计独立即可。

对式(2)两端实行算子 Γ 运算, 结合式(3)得

$$\Gamma(y(t))=\Gamma(Wx(t))=W\Gamma(x(t))=WA\Gamma(s(t)) \quad (4)$$

式(4)表明, 分离信号频段与源信号频段一一对应。由此得到第二种基于子带分解的瞬时盲源分离方法: 选择一个合适的滤波器组, 利用 ICA 算法得到所有频段上的时域分离信号, 对次序和幅度不一致做出调整后, 即可利用这些分频段信号恢复出原始信号。由于涉及滤波器组的选择和两个不确定因素

的消除, 所以在实现瞬时盲源分离时, 第二种方法比第一种方法来得复杂。但是, 在实现卷积信号盲源分离时, 由于大多数盲源分离算法目的是得到分离信号, 而不是信道均衡系数, 因而只能采用第二种方法实现信号分离^[8,9]。本文采用方法一讨论瞬时信号盲源分离问题。

为了便于与子带分解盲源分离方法相对应, 文中将普通的不进行子带分解盲源分离算法称为全波段盲源分离方法。可以通过简单的仿真实验验证, 对无噪瞬时混合模型式(1), 基于子带分解的盲源分离方法和全波段盲源分离方法分离性能基本接近。

3 噪声环境下基于子带分解的水声信号盲源分离

当存在噪声背景时, 瞬时混合模型为

$$x(t)=As(t)+n(t) \quad (5)$$

大多数盲源分离算法在噪声存在的情况下, 分离性能大大下降。下面针对混合在水声信号中的宽带高斯噪声提出一种较为稳健的瞬时盲源分离算法。

3.1 白化矩阵的修正

无噪模型式(1)对观测数据进行白化时, 需要找到一个正交矩阵 Q , 使

$$R_{x_{xx}}=E[x_w(t)x_w^T(t)]=QR_{xx}Q^T=I \quad (6)$$

白化矩阵 Q 可记为

$$Q=[R_{xx}]^{-1/2} \quad (7)$$

而对于有噪模型式(2), 由于混合信号的相关矩阵 R_{xx} 不仅包含源信号, 同时还包含噪声信号成分, 即 $R_{xx}=AR_{ss}A^T+R_{nn}$, 因而将式(7)修正如下

$$Q=[R_{xx}-R_{nn}]^{-1/2} \quad (8)$$

对白化矩阵进行修正需要对噪声方差做出大致估计, 这种在分离初始阶段对白化阵的修正已经被文献^[5]证明是可行的。

3.2 基于子带分解的水声信号盲源分离

本文考虑噪声类型为宽带高斯白噪声, 且假设噪声功率在所有频段上接近一致。水声信号的频谱特点是低频分量普遍较高: 潜艇信号谱在 100Hz 以下成分丰富, 水面舰艇信号谱集中在几百赫兹附近, 而鱼雷信号主要在 1.5kHz 以下存在较多线谱。因而, 在进行信号分离前首先分析混合信号的频谱分布情况, 确定功率最强频谱区域。该信号段信噪比

必然比其它频段信噪比强得多, 利用这部分信号进行盲源分离, 有助于降低了噪声对信号分离造成的影响。

文献[5]在评价分离性能时, 是对全局矩阵 $C=WA$ 进行评价, 其本质上和交叉干扰测度 (ISI) 一致

$$ISI(C)=\sum_{i=1}^n\left(\sum_{j=1}^n\frac{|C_{ij}|}{\max_k|C_{ik}|}-1\right)+\sum_{j=1}^n\left(\sum_{i=1}^n\frac{|C_{ij}|}{\max_k|C_{kj}|}-1\right)\quad(9)$$

作为对信号混合形式的消除, ISI 测度反映了分离优劣, ISI 值越小分离效果越好, 当全局矩阵为对角阵或者对角阵的排列阵时, $ISI(C)=0$ 。

4 JADE 算法基本过程

考虑到 Infomax 算法^[1]中步长因子的选择对分离性能影响较大, 因而本文仿真中瞬时盲源分离基本算法采用 JADE^[3]算法, 该算法通过对四阶累积量矩阵的联合对角化, 得到混合矩阵 A 的估计, 即所谓对信道的“辨识”。图 1 为 JADE 基本原理图。

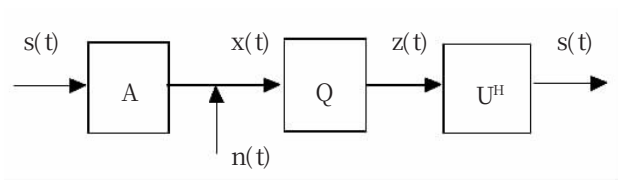


图 1 JADE 算法基本原理图
Fig.1 Basic principle of JADE algorithm

JADE 算法基本过程说明如下:

- (1) 计算观测样本的协方差矩阵 R_{x_0} , 估计出白化矩阵 W ;
- (2) 计算白化过程 $z(t)=Qx(t)$ 的四阶累积量矩阵 Q_z 集合, 并从中获取特征集合 N^e , 即获得 n 个最有效特征对 $\{\lambda_r, M_r|1\leq r\leq n\}$;
- (3) 联合对角化 $N^e=\{\lambda_r, M_r|1\leq r\leq n\}$, 获得酉阵估计 U ;
- (4) 混合矩阵 A 的估计为 $A=Q^*U$ 。

采用 JADE 算法的一个重要原因是, 高斯噪声三阶以上的累积量为零, 因而 JADE 算法对高斯背景下含噪盲源分离性能比较稳定。

5 仿真实验

以 3×3 混合模型为例, 研究在噪声环境下的盲

源分离。三路源信号为海上实录舰船信号, 分别来自不同的舰船, 信号采样频率均为 6kHz, 每路信号的标准偏差 $\sigma_{s_i}(i=1, 2, 3)$ 。产生一个 3×3 随机混合矩阵 A 为

$$A=\begin{pmatrix}1.6342 & 0.6716 & 0.2685 \\ 0.8252 & -0.5081 & 0.6250 \\ 0.2308 & 0.8564 & -1.0473\end{pmatrix}$$

5.1 仿真一

本仿真目的是研究基于子带分解的盲源分离算法是否具有优化效果, 以及如何才能实现这个优化效果。

取高斯宽带噪声信号 $R_m=\sigma_n^2I, \sigma_n=0.18$ 。经过有噪模型式(5)混合后得到三路混合信号。利用 JADE 算法对混合信号实行盲源分离, 经过 300 次仿真得到的 ISI 均值为 $ISI(C)=0.9012$ 。

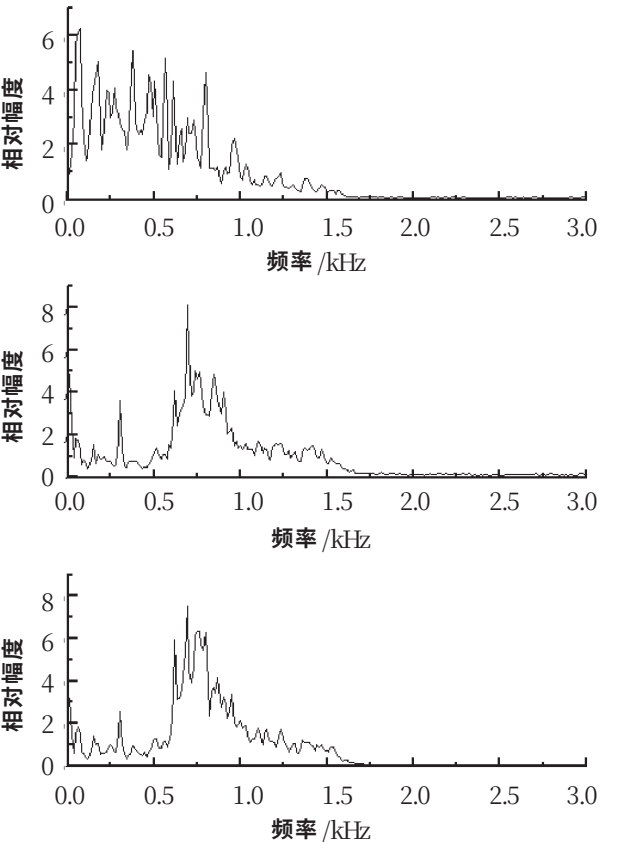


图 2 三路混合信号频谱曲线
Fig.2 Frequency spectrum of three mixture signals

考虑采用本文提出的基于子带分解的盲源分离算法对混合信号进行盲源分离。图 2 为三路混合信号频谱图, 由图 2 看出主要频率成分集中在 1.5kHz 以下。根据图 2 反映的混合信号频谱曲线, 设计 FIR 线性滤波器, 为验证不同滤波区域分离效果, 文中采

用 0~1kHz、0~1.5kHz 和 0.5kHz~1.5kHz 三个滤波区域,对混合信号进行滤波处理,然后利用 JADE 算法对不同的子带信号进行盲源分离。经过 300 次仿真实验取均值,得到以 ISI 表征的分离性能见表 1。表 1 同时考虑了采用修正白化阵对分离结果的影响。

表 1 基于子带分解盲源分离算法分离性能(300 次实验均值)
Table 1 Separation performance based on subband decomposition BSS

滤波范围 /kHz	ISI(C)	
	修正白化阵	一般白化阵
0~1	0.7115	0.7418
0~1.5	0.6705	0.8897
0.5~1	2.2446	2.2584

对表 1 结果分析如下:(1)采用修正白化阵比采用未改进的白化阵分离效果好;(2)选择 0~1kHz 和 0~1.5kHz 对混合信号进行滤波后,无论采用修正白化阵还是一般白化阵,得到的 ISI 值均小于 0.9012,这说明实行基于子带分解的盲分离算法能提高分离效果。

表 1 中最后一行数据值得引起注意,0.5kHz~1kHz 子带分解盲源分离算法效果非常差。经过多次类似实验,效果一直较差。结合图 2 混合信号频谱曲线,分析其效果下降的主要原因是,某个水声目标的主要功率能量集中在 0~0.5kHz,而在 0.5kHz~1kHz 范围内该信号功率能量很弱,甚至与噪声功率相当或更弱,这样在 0.5kHz~1kHz 范围进行滤波处理该信号就湮没在环境噪声中,导致其不能被有效分离出来,从而分离性能大大降低。图 3 示出三路原始信号实际频谱曲线,其中第三路信号频谱曲线确实与上述分析结果基本相符。

因而,选择合适的滤波区间对分离性能影响很大。从大量实验仿真结果可以得出这样一个结论,滤波区间必须包含各路混合信号中功率较强谱段,对于在某些频段上所有混合信号的谱线均呈下降走势,可以粗略设置一个门限。比如对于图 2,由于在 1kHz 频率值上三路信号谱线值还保持在一定幅度,在此设置滤波区间分离效果肯定受到影响,这也是在这个区间分离效果($ISI=0.7115$)比在 1kHz~1.5kHz 区间分离效果($ISI=0.6705$)差的原因。

考虑在频率 1.2kHz 附近谱值下降比较明显,对三路混合信号在 0~1.2kHz 范围进行滤波。图 4 为设计的 64 阶 FIR 滤波器幅频特性曲线,数字频率 p

对应 3kHz。经过基于子带分解的盲源分离对混合系统进行分离,得到 $ISI=0.6118$,这个结果要比前面几次分离效果都来得好。

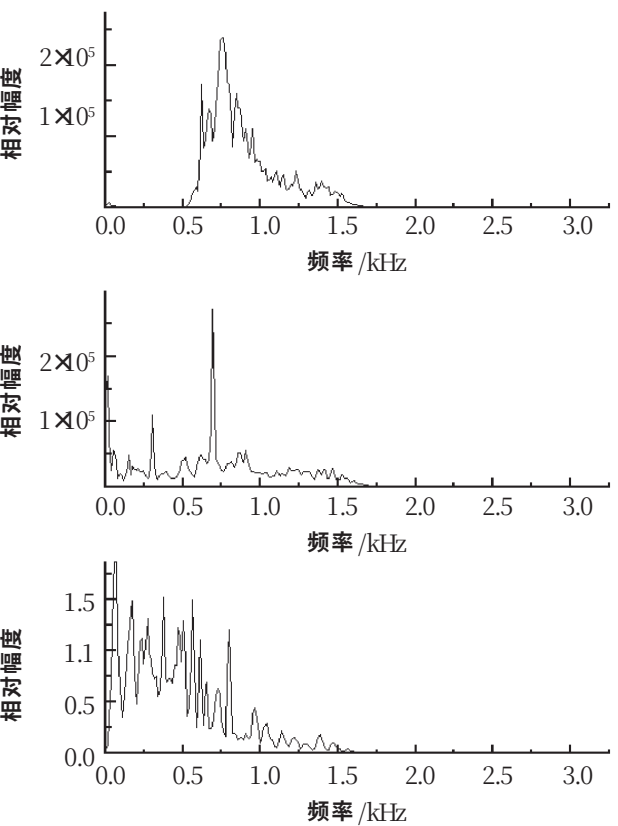


图 3 三路原始信号频谱曲线
Fig.3 Frequency spectrum of three original signals

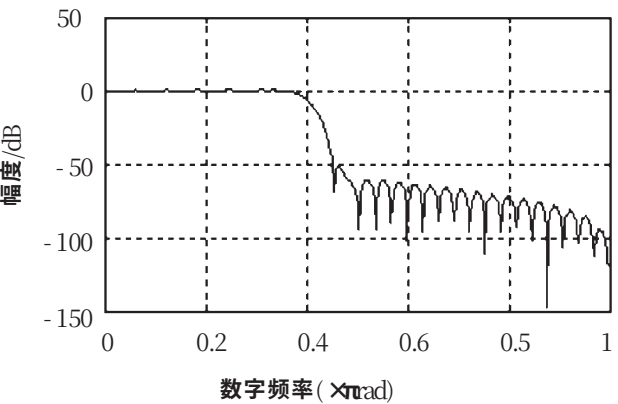


图 4 FIR 滤波器幅频特性($f_{\text{nyquist}}=3\text{kHz}$)
Fig.4 Amplitude-frequency characteristic of FIR filter

5.2 仿真二

本仿真目的是研究基于子带分解的盲源分离算法稳健性。本仿真采用与仿真一相同源信号和混合矩阵,通过改变噪声方差来研究在不同噪声环境下算法稳定性。取噪声偏差 σ_n 从 0 开始,每次增加 0.04,最大值为 0.24。分别对混合信号在 0~1.2kHz

和 0~1.5kHz 二个区间进行滤波,最后利用 JADE 算法进行水声信号盲源分离。各组实验分别进行 300 次,得到 ISI 均值曲线见图 5,该图同时给出了全波段盲源分离 ISI 效果曲线。由分离曲线可知:(1)在环境噪声强度较弱的情况下,二个基于不同子带盲源分离算法和全波段盲源分离算法分离效果比较接近;(2)随环境噪声强度不断增强,基于子带分解的盲源分离算法能明显改善分离效果,而且这种性能改善表现出良好的稳健性。

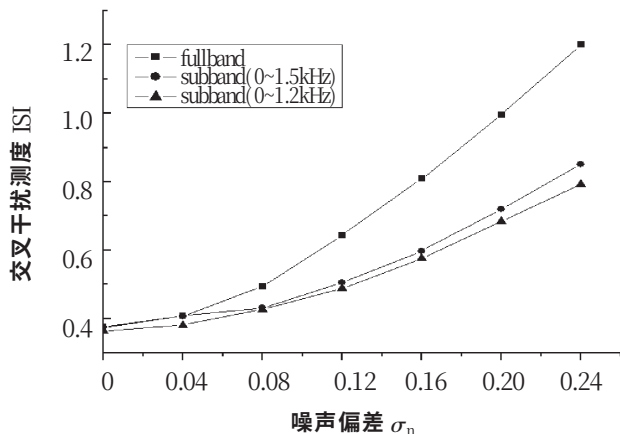


图 5 子带分解盲源分离算法分离性能 ISI 曲线

Fig.5 Separation performance based on subband decomposition BSS method

6 结 论

本文首先研究了无噪情况下基于子带分解的瞬时盲源分离算法;在此基础上,提出了一种适用于噪声环境的基于子带分解的瞬时盲源分离算法,通过修正白化矩阵和选取合理子带两个主要环节来降低噪声对盲源分离产生的不利影响。仿真实验表明,采用基于子带分解的瞬时盲源分离算法能够较好地实现在噪声环境下对水声混合信号的分离;进一步研

究表明,本算法在噪声环境下表现出良好的稳健性。

参 考 文 献

- [1] Cardoso J F. Infomax and maximum likelihood for source separation[J]. IEEE Signal Processing Letter, 1997, 4: 112-114.
- [2] Yang H, Amari S. Adaptive on-line learning algorithms for blind separation: Maximum entropy and minimum mutual information[J]. Neural Computation, 1997, 9: 1457-1482.
- [3] Hyvarinen A, Oja E. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis[J]. Neural Computation, 1997, 9: 1483-1492.
- [4] Cardoso J F. High order contrasts for independent component analysis[J]. Neural Computation, 1999, 11: 157-192.
- [5] Douglas S C, Cichocki A, Amari S. Bias removal technique for blind source separation with noisy measurements[J]. Electronics Letters, 1998, 34(14): 1379-1380.
- [6] Hyvarinen A. Gaussian moments for noisy independent component analysis[J]. IEEE Signal Processing Letters, 1999, 6(6): 145-147.
- [7] Tanaka T, Cichocki A. Subband decomposition independent component analysis and new performance criteria [A]. Proc of ICASSP 2004[C]. Montreal Canada, 2004: 541-544.
- [8] Araki S, Makino S, Aichner R, et al. Subband based blind source separation with appropriate processing for each frequency band[A]. Proc of ICA2003[C]. Nara Japan, 2003: 499-504.
- [9] Huang J, Yen K C, Zhao Y. Subband-based adaptive decorrelation filtering for co-channel speech separation [J]. IEEE Transaction on Speech and Audio Processing, 2000, 8(4): 402-406.