

新型信号预处理分离系统算法及性能分析

王建功¹, 沈越泓¹, 魏红艳²

(1 中国人民解放军理工大学 通信工程学院, 江苏 南京 210014; 2 北京信息技术研究所, 北京 100094)

摘 要: 提出了一种新的信号预处理半盲分离算法(pre-processing second-order cyclostationary BSS algorithm, pP-SoCBSS). 该算法通过对信号进行预处理, 使源信号具有可控的循环平稳特性, 利用该特性在接收端对信号进行有效分离. 此方法通过对发射端源信号进行预处理、信道识别和信号分离, 使接收端可以精确地估计信道混合矩阵, 并且具有优越的抗噪声特性, 该方法即使在欠定的条件下也同样可以进行信道识别且性能没有损失. 同时, 通过计算机仿真对分离矩阵的估计效果采用 PI 指数进行衡量, 并与 JADE 算法和 SOBI 算法进行了比较, 仿真结果表明采用算法 PI 指数性能优于两种传统算法.

关键词: 盲源分离; 二阶循环平稳; 预处理; 无线信道统计复用

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)12-0130-04

Pre-Processing Second-Order Cyclostationary BSS Algorithm and Its Performance Analysis

WANG Jian-gong¹, SHEN Yue-hong¹, WEI Hong-yan²

(1 ICE, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2 Beijing Institute of Information Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: In this paper, a new semi blind signal preprocessing algorithm (second-order cyclostationary BSS algorithm pPSoCBSS-pre-processing) is proposed. The algorithm is used to pre process the signal, so that the source signal has a controlled cycle stable characteristic, and the signal is effectively separated at the receiving end. Love method based on the transmitter source signal preprocessing, channel identification and signal separation, so that the receiver can estimate the channel mixing matrix accurately, and has excellent anti noise characteristics, this method even in underdetermined condition also can be identified and the channel performance is not lost. At the same time, measured through the computer simulation of the separation matrix estimation effect with the PI index, and compared with the JADE algorithm and SOBI algorithm, the simulation results show that the algorithm has better performance than the PI index of two kinds of traditional algorithm.

Key words: blind source separation; second-order cyclostationarity; pre-processing; wireless statistical division multiplexing(WSDM)

1 引言

近二十年来,盲信号处理已经得到越来越多科研工作者和研究机构的广泛关注和深入研究,最早的主成分分析方法已经引起了人们的注视,独立成分分析方法使得盲信号分离相关课题研究有了质的飞跃,随后的稀疏成分分析、非负矩阵分析、张量分

解方法,表明盲信号处理的手段越来越多样化,也在许多的领域得到了应用:如语音图像信号处理、医学信号处理、宇宙空间信号处理及通信信号处理等.

2009 年,沈越泓^[1]等人提出了一种新的无线信道复用方式—无线信道统计复用(WSDM),能极大提高无线信道的频谱利用率. 该复用方法的基本思想是在接收端采用独立成分分析的方法,将若干路

时域频域相互重叠的信号分离开来,提取所需的信号,以达到信号复用的目的.本文所提出的信号预处理及分离算法(pPSoCBSS)可以作为WSDM的一种实现方案.该算法与传统的盲分离方法JADE和SOBI相比,具有更加优越的信号分离性能.

算法对发送端信号进行预处理,使源信号具有二阶循环平稳特性.在接收端,利用二阶循环平稳特性提取信道的混合矩阵,再用混合矩阵求逆或者是贝叶斯分析的方法,求解源信号.该算法运用于无线信道统计复用系统,不但有极高的频谱利用率,而且在信号分离性能上也优于一些传统的盲分离处理方法,具有较好的应用价值^[2-4].

2 信号模型的建立

2.1 循环平稳信号

循环平稳信号是一类非平稳信号,具有循环遍历性.在该文中,我们利用了信号的二阶循环平稳特性.如果信号 $s(t)$ 的二阶变换为 $R_s^{\alpha*}$, R_s^{α} 至少有一个在 $\tau \triangleq [\tau_1, \tau_2]^T \in \mathbb{R}^2$ 上不等于零,则称 $s(t)$ 具有二阶循环平稳特性^[5-6].

$$R_s^{\alpha*}(\tau) \triangleq \langle s(t+\tau_1)s^*(t+\tau_2)e^{-j2\pi\alpha t} \rangle_t \quad (1)$$

$$R_s^{\alpha}(\tau) \triangleq \langle s(t+\tau_1)s(t+\tau_2)e^{-j2\pi\alpha t} \rangle_t \quad (2)$$

式中, $R_s^{\alpha*}$ 为循环自相关函数; R_s^{α} 为循环共轭自相关函数; $\langle \cdot \rangle_t$ 为时间平均函数; $*$ 为复共轭; T 为向量转置操作符.在对源信号进行预处理时,使源信号具有二阶循环平稳特性,在接收端,利用这个循环平稳特性对信道混合矩阵进行估计,进而分离源信号^[7-9].

2.2 信号模型

盲信号分离的研究中有许多信号模型,如线性瞬时混合模型、卷积模型、非线性模型等.在信号的带宽明显小于信道带宽的前提下,可以采用线性瞬时混合模型.该文采用了线性瞬时混合模型^[10]:

$$\vec{y}(t) = A\vec{s}(t) + \vec{n}(t) \quad (3)$$

观测信号 $\vec{y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)]^T$ 为源信号 $\vec{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$ 的线性组合, $\vec{n}(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_N(t)]^T$ 为加性高斯白噪声, A 是 $N \times M$ 的未知混合矩阵,矩阵元素为 a_{ij} . N 和 M 分别表示观测信号数和源信号数. $M > N$ 时为欠定条件, $M < N$ 时为超定条件, $M = N$ 时为适定条件.

在这里,我们设定发射端信号为 $\vec{s}'(t)$,在对发

射端信号进行的预处理中,引入了导频信号 $\vec{f}(t) = [\dots, \exp(j2\pi f_i t), \dots]^T$,每一路源信号与对应的导频信号相乘,得到实际的发射信号为

$$\begin{aligned} \vec{s}(t) &= \vec{s}'(t) \cdot \vec{f}(t) \\ &= [\dots, s_i'(t)\exp(j2\pi f_i t), \dots]^T \end{aligned} \quad (4)$$

3 信号预处理及信道识别算法

3.1 信号预处理

在发送信号前,要对源信号 $\vec{s}'(t)$ 进行预处理,得到发射信号 $\vec{s}(t)$.本文中,我们对源信号 $\vec{s}(t)$ 做出如下假设信号为平稳、遍历的信号,且信号均值为零;信号与信号之间相互独立;工作在相同的频带.

对源信号预处理时,引入预处理信号向量 $\vec{f}(t) = [\dots, \exp(j2\pi f_i t), \dots]^T$,预处理后的信号表达式为

$$\begin{aligned} \vec{s}(t) &= \vec{s}'(t) \cdot \vec{f}(t) \\ &= [\dots, s_i'(t)\exp(j2\pi f_i t), \dots]^T \end{aligned} \quad (5)$$

其实质含义就是将每路源信号与相应的导频信号相乘,构成发射信号,每路导频信号的频率各自不同.第 i 路发射信号的表达式为

$$s_i(t) = s_i'(t)\exp(j2\pi f_i t) \quad (6)$$

为了更有效地利用频带的频率资源,对临居信号 $s_i(t) = s_i'(t)\exp(j2\pi f_i t)$ 和 $s_j(t) = s_j'(t)\exp(j2\pi f_j t)$ 的导频频率做出限制:

$$0 < |f_i - f_j| < W/2 \quad (7)$$

通过限制条件不难看出临近信号 $s_i(t)$ 和 $s_j(t)$ 的频带是相互交叠的,在这种情况下,依然可以对混合矩阵进行精确的估计并分离源信号.

3.2 算法的可行性分析

源信号 $\vec{s}'(t)$ 经过预处理,加入导频信号构成待发射的源信号 $\vec{s}(t)$,通过加性高斯白噪声信道,在接收端的信号可以表示为

$$y_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}s_j'(t)\exp(j2\pi f_j t) + n_i(t) \quad (8)$$

$y_i(t)$ 在 $\tau = 0$ 时的循环共轭自相关函数为

$$\begin{aligned} R_{y_i}^{\alpha}(0) &= \langle \left(\sum_{j=1}^N a_{ij}s_j'(t)\exp(j2\pi f_j t) + n_i(t) \right)^2 \exp(-j2\pi\alpha t) \rangle_t \\ &= \langle \left(\sum_{j=1}^N a_{ij}s_j'(t)\exp(j2\pi f_j t) + n_i(t) \right)^2 \exp(-j2\pi\alpha t) \rangle_t \end{aligned} \quad (9)$$

令 $x_i(t) = \sum_{j=1}^N a_{ij}s_j'(t)\exp(j2\pi f_j t)$,将式(9)右

边的平方式展开可以得到下面的公式:

$$R_{y_i}^a(0) = \langle x_i^2(t) \exp(-j2\pi\alpha t) \rangle_t + \langle 2x_i(t)n_i(t) \exp(-j2\pi\alpha t) \rangle_t + \langle n_i^2(t) \exp(-j2\pi\alpha t) \rangle_t \quad (10)$$

不难看出, 对于所有的 α , $\langle s_j'(t) \exp(j2\pi f_j t) n_i(t) \exp(-j2\pi\alpha t) \rangle_t |_{t \rightarrow \infty} = 0$, 所以, 式(10) 右边的第二项渐进为零.

式(10) 的第三项分析如下:

$$\langle n_i^2(t) \exp(-j2\pi\alpha t) \rangle_t |_{t \rightarrow \infty} = \begin{cases} 0, & \alpha \neq 0 \\ \sigma_{\text{noise}}^2, & \alpha = 0 \end{cases}$$

算法中, 循环频率 $\alpha = 0$ 的情况可以忽略. 因此, 式(10) 第三项在 $\alpha \neq 0$ 时渐进为零.

因此, 式(10) 可以简化为如下表达式:

$$R_{y_i}^a(0) |_{\alpha \neq 0, t \rightarrow \infty} = \langle x_i^2(t) \exp(-j2\pi\alpha t) \rangle_t \quad (11)$$

不难看出, 式(11) 等号右面第一项渐进为零 (因为源信号相互独立且均值为零). 因此式(11) 可以简写为如下表达:

$$R_{y_i}^a(0) |_{\alpha \neq 0, t \rightarrow \infty} = \langle \sum_{j=1}^N a_{ij}^2 s_j'^2(t) \exp(-j2\pi(\alpha - 2f_j)t) \rangle_t \quad (12)$$

由于源信号的遍历性, 可以得到 $\alpha \neq 2f_j$ 时, $R_{y_i}^a(0) |_{\alpha \neq 0, t \rightarrow \infty} = 0$, 所以式(12) 可以表达为

$$R_{y_i}^a(0) |_{\alpha = 2f_j, t \rightarrow \infty} = a_{ij}^2 \sigma_j^2 \quad (13)$$

式(13) 可以表达为 $R_{y_i}^a(0) |_{\alpha \neq 0, t \rightarrow \infty}$ 的矩阵元素:

$$R_{y_i}^a(0) |_{\alpha \neq 0, t \rightarrow \infty} = \begin{bmatrix} a_{11}^2 \sigma_1^2 & a_{12}^2 \sigma_2^2 & \cdots & a_{1N}^2 \sigma_N^2 \\ a_{21}^2 \sigma_1^2 & a_{22}^2 \sigma_2^2 & \cdots & a_{2N}^2 \sigma_N^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1}^2 \sigma_1^2 & a_{N2}^2 \sigma_2^2 & \cdots & a_{NN}^2 \sigma_N^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

将式(14) 中的矩阵第一行归一化并且取矩阵的平方根得到 $\hat{\mathbf{A}}$

$$\hat{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ a_{21}/a_{11} & a_{22}/a_{12} & \cdots & a_{2N}/a_{1N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N1}/a_{11} & a_{N2}/a_{12} & \cdots & a_{NN}/a_{1N} \end{bmatrix} \quad (15)$$

用求得的 $\hat{\mathbf{A}}^{-1}$ 作为解混矩阵, 可以得到如下表达式:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{s}}_{\text{noise}}(t) &= \hat{\mathbf{A}}^{-1} \hat{\mathbf{y}}(t) = \\ [a_{11}s_1(t) + n_1'(t), a_{12}s_2(t) + n_2'(t), \cdots, a_{1N}s_N(t) + n_N'(t)]^T \end{aligned} \quad (16)$$

对 $\hat{\mathbf{s}}_{\text{noise}}(t)$ 进行降噪处理后理论上可以得到

$\hat{\mathbf{s}}(t) = [a_{11}s_1(t), a_{12}s_2(t), \cdots, a_{1N}s_N(t)]^T$, 不难看出, $\hat{\mathbf{s}}(t)$ 和 $\mathbf{s}(t)$ 相差的仅仅是幅度上的关系, $\hat{\mathbf{s}}(t)$ 可以看做是 $\mathbf{s}(t)$ 的估计. 因此, 可以得到结论: 式(16) 中的 $\hat{\mathbf{A}}$ 可以作为混合矩阵的等效估计.

4 仿真实验

在本段中, 将通过仿真实验来说明该文所提预处理信号半盲分离算法的性能优势. 该文采用 PI 指数作为算法性能比较的参考值. PI 指数的定义如下:

$$\text{PI}(\mathbf{G}) = \log \left\{ \left[\sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^N \frac{|g_{ij}|}{\max_j |g_{ij}|} - 1 \right) + \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^N \frac{|g_{ij}|}{\max_i |g_{ij}|} - 1 \right) \right] / 2^N \right\}$$

式中, $\mathbf{G} = \mathbf{W}\mathbf{A}$, 其中 $\mathbf{W}$ 为估计得到的解混矩阵, g_{ij} 为矩阵 $\mathbf{G}$ 的第 (i, j) 个元素, $\max_i |g_{ij}|$ 为矩阵第 i 列的最大绝对值. PI 指数的本质含义是衡量矩阵 $\mathbf{G}$ 与单位阵 $\mathbf{I}$ 的相似程度.

仿真实验分为三个部分, 分别验证了算法的可行性、无噪环境下算法的渐进特性及有噪环境下算法的渐进特性. 在所有的三个仿真实验中, 都采用三路源信号及三路接收接收混合信号, 源信号为零均值高斯信号, 假定信号模型为线性瞬时混合, 混合矩阵 $\mathbf{A}$ 为随机产生.

4.1 渐进性能

在本段仿真实验中, 分析了所提算法的渐进性能, 并在无噪的条件下, 与传统的 BSS 算法 JADE 和 SOBI 的 PI 指数进行了对比. 混合矩阵随机取得. 相应的仿真参数如表 1 所示.

表 1 仿真实验的相关数据

f_s	T	仿真次数 (T)	载波频率/kHz		
			f_1	f_2	f_3
16 kHz	500~10 ⁴	10 000	1.5	2	2.5

注: f_s 为采样频率, T 为采样数.

在渐进性能仿真实验中, 本文仿真了不同采样数下的平均 PI 指数, 例如, 在采样数 T 的情况下, 我们随机产生了 10 000 组信号, 每组为三路源信号, 每组三路源信号按该文所提算法预处理形成三路接收信号并依照算法中方法进行混合矩阵估计, 并计算出 PI 指数, 将 10 000 组 PI 指数求平均值作为采样数为 T 的 PI 指数. 采样数分别取 $T=500, 1\ 000, 2\ 000, 3\ 000, 4\ 000, 5\ 000, 6\ 000, 7\ 000,$

8 000,9 000 和 10 000 来查看不同采样数下 PI 指数的渐进特性.

图 1 所示为所提算法和 JADE、SOBI 算法 PI 指数的渐进特性对比,X 轴表示采样数,Y 轴表示 PI 指数的值.

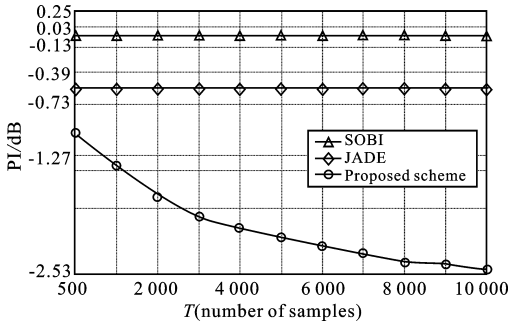


图 1 无噪条件下 PI 指数性能对比

通过观察图 1 所示的三种算法的渐进特性对比,可以得出以下结论:(1)本文所提的预处理信号分离方案在 PI 指数性能上要优于传统的盲分离方法 JADE 和 SOBI;(2)传统盲分离算法 JADE 和 SOBI 的 PI 指数性能几乎不受采样数的影响,该文所提的预处理信号分离方案 PI 指数性能随着采样数的增加而提高.

4.2 噪声环境下的性能分析

在本节仿真实验中,我们分析了噪声环境下所提预处理信号分离方案的 PI 指数性能.源信号为标准正太分布随机信号,混合矩阵如式(17)所示.相应的实验参数如表 2 所示.

表 2 仿真实验相关参数

f_s	T	仿真次数 (T)	载波频率/kHz		
			f_1	f_2	f_3
16 kHz	1 000 ~10 000	0~20dB	1.5	2	2.5

在本节仿真实验中,对每个样点的 PI 指数均为 10 000 组仿真实验所得 PI 指数的平均值.本节仿真实验展示了所提预处理信号分离方案的 PI 指数与信噪比(SNR)之间的关系.信噪比的范围是 0~20 dB,本节仿真实验分别对 $T=1\,000,5\,000$ 和 10 000 个样值点的情况进行了仿真.仿真结果如图 2 所示.

通过仿真结果可以得出以下结论:(1)所提预处理信号分离方案在进行混合矩阵估计时,PI 指数的性能受信噪比变化的影响,信噪比的提高 PI 指数性能会随之提升,反之,信噪比性能恶化,PI 指数的性能也会随之恶化;(2)所提预处理信号分离方案在进行混合矩阵估计时,PI 指数的性能在同样的噪声条

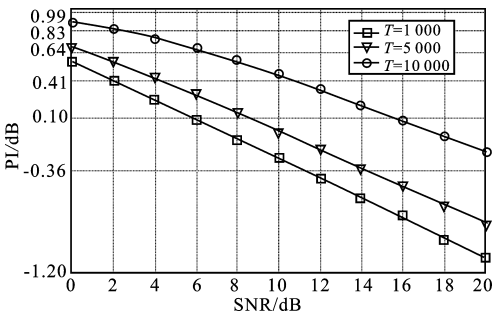


图 2 不同 SNR 时算法 PI 指数性能对比

件下,受到采样数的影响,采样数增加,PI 指数性能随之变好,反之随着采样数的减少,PI 指数性能会随之变差.

5 结束语

本文提出一种新的基于二阶循环平稳的预处理盲信号分离方案,本方案可以作为 WSDM 系统的实现方法,为实现 WSDM 提供了更加灵活且性能优越的解决方案,具有较高的频谱利用率.该文的仿真实验表明,该文所提出的预处理信号分离方案在 PI 指数的性能上优于传统的盲分离方法 JADE 和 SOBI.

参考文献:

[1] Shen Yuehong,Xu Kui,Chen Shouqi,et al. The wireless communication system of statistical multiplexing [P]. National Invention Patent; 200910028468, 2009-07-22.

[2] Cardoso J F. Source separation using higher order moments[C]//1989 IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing. Glasgow,Scotland;IEEE ,1989;2109-2112.

[3] Cardoso J F. Eigen-structure of the fourth-order cumulant tensor with application to the blind source separation problem[C]//1990 IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing. Albuquerque,NM,USA;IEEE,1990;2655-2658.

[4] Cardoso J F. Blind signal separation; statistical principles[J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86 (10); 2009-2025.

[5] 宁娜,王鹏. 调频步进频雷达信号处理关键技术研究[J]. 电子设计工程, 2015, 23(13):1-4.

[6] Hyvarinen A. A family of fixed-point algorithms for independent component analysis[C]//1997 IEEE International Conference on Acoustics,Speech and Signal Processing. Munich,Germany;IEEE,1997;3917-3920.

[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

[4] Maarif H A Q, Gunawan T S, Priantoro A U. Complexity evaluation in scalable video coding[J]. Multimedia-An International Journal (AMIJ), 2010, 1(1): 12-25.

[5] Boyce J M, Ye Y, Chen J, et al. Overview of SHVC: Scalable Extensions of the High Efficiency Video Coding Standard[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016, 26(1): 20-34.

[6] Kofler I, Kuschnig R, Hellwagner H. In-network adaptation of H. 264/SVC for HD video streaming over 802.11 g networks[C]//Proceedings of the 21st international workshop on Network and operating systems support for digital audio and video. ACM, 2011: 9-14.

[7] 卢鑫,林茂六,金雪松,等. 新一代可伸缩视频编码标准:背景、特征、技术及其应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(10): 1415-1423.

[8] 任宏. H. 264 扩展标准—可伸缩视频编码(SVC)及其其中精细可伸缩编码的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009.

[9] Schwarz H, Wien M, Vieron J. JSVM software manual[Z]. ISO/IEC JTC1 and ITU-T, CVS tag: JSVM_9_19_14, 2011.

作者简介:

蒋宇浩 男,(1993-),硕士研究生. 研究方向为可伸缩视频编解码研究与实现.

余林琛(通讯作者) 女,(1977-),博士,副教授. 研究方向为云计算、移动视频.

E-mail:linchenyu_cug@foxmail.com.

(上接第 133 页)

[7] Hyvarinen A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis[J]. IEEE Transactions on Neural Networks,1999,10(3):626-634.

[8] Chenot C,Bobin J, Rapin J. Robust Sparse Source Separation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(11):2172-2176.

[9] Kang Jaewook,Jung Hyoyoung, Kim Kiseon. Fast signal separation of 2-D sparse mixture via approximate message-passing[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015,22(11):2024-2028

[10] Ma Xiaohong, Ding Shuxue, SongJifei, et al. Underdetermined blind separation of weak sparse sources via matrix transform layer by layer in the Time-Frequency domain[C] // IEEE 7th International Conference on Awareness Science&Technology. Qinhuangdao, China:IEEE,2015:96-100.

作者简介:

王建功 男,(1982-),博士研究生. 研究方向为通信信号处理. E-mail:wangjiangong_78@163.com.

沈越泓 男,(1957-),博士,教授. 研究方向为通信与信息系统、通信信号处理.

魏红艳 女,(1982-),硕士,工程师. 研究方向为通信与信息系统、通信信号处理.