

# 基于二次裂变粒子群算法的盲信号分离

邵明省<sup>1</sup>, 张思维<sup>2</sup>

(1. 鹤壁职业技术学院 电信系, 河南 鹤壁 458030; 2. 黄淮学院 电子科学与工程系, 河南 驻马店 463000)

**摘 要:**针对粒子群算法对盲信号分离存在的问题, 提出二次裂变技术。首先将粒子集中的权值按照逐渐递减顺时针的进行排序, 减少搜索算法的时间开销; 接着选取一定数目大权值的粒子进行裂变繁殖, 繁殖后再生的粒子自粒子集权值的低端逆时针依次覆盖原小权值的粒子, 数目正比于原来的粒子群; 最后对第二次裂变的数目判断, 进行相应扩展或者收缩运算。实验仿真结果表明: 二次裂变粒子群算法具有分离效果好、收敛速度快的优点。

**关键词:**大权值; 二次裂变; 收缩因子

**中图分类号:** TN911; TP1274.2

**文献标识码:** A

## The Blind Source Separation Based on Particle Swarm Optimization Algorithm of the Secondary Fission

SHAO Mingsheng<sup>1</sup>, ZHANG Siwei<sup>2</sup>

(1. Hebi Occupation Technology College Telecom Department, Hebi 458030, China;

2. Huanghuai College Electronic Science and Engineer, Zhumadian 463000, China)

**Abstract:** In view of the defects of the particle swarm optimization (PSO) algorithm to the blind source separation (BSS), the secondary fission technique was proposed in this paper. First, the particle pooled weight value was sorted by the rule of clockwise declining gradually to lower the time cost of the searching algorithm. Then the large weight value particles with certain numbers were selected to carry out the particle reproduction by fission. The reproduced particles anti-clockwise covered the original particles with small weight value from the particle pool at low end, which the number of the particle was directly proportional to the original particle swarm. Finally, the second fission particle numbers were distinguished to carry out the corresponding contraction operation or extended operation. The experimental simulation results showed that the particle swarm optimization (PSO) algorithm of the secondary fission had the advantages of good separation effects and fast convergence.

**Key words:** large weight value; secondary fission; contraction factor

### 0 引言

盲信号分离是在对源信号及传输过程无任何先验知识的条件下, 对接收到的信号进行处理, 分离出源信号的过程。目前, 基本粒子群算法对盲信号处理存在参数设置、“早熟”和稳定性问题。只有参数设置合适好, 才能使算法得到最优解。“早熟”现象使粒子寻优停留在局部最小值, 没有达到全局最优解; 同时粒子的初始位置、速度和一些参数被随机初始化, 运行的结果每次并不相同, 有时差别很大, 导致了分离盲信号结果并不稳定<sup>[1]</sup>。

国际上在粒子群优化算法的改进, 首先是由 Kennedy 和 Eberhart 于 1997 年提出的二进制粒子

群优化算法, 即把粒子群算法和遗传算法的交叉、变异特性结合, 提高粒子群算法的收敛性能, 但没有解决处理数据盲信号时间的问题。同时, Shi 和 Eberhart 在 1998 年把粒子惯性权重融入到粒子群速度中去, 但最终没有摆脱局部极优点的束缚。1999 年, Clerc 对粒子群算法方程中引入收缩因子, 保证算法的收敛性, 但算法只应用于分类问题<sup>[2]</sup>。

目前, 国内对于粒子群算法采用一次裂变技术的只有程水英一人, 其思想为权值排序、裂变繁殖和权值归一, 克服了样本枯竭问题, 算法的鲁棒性更强; 但要求裂变繁殖时为高斯分布, 同时怎么防止过度裂变繁殖及粒子权值分配等问题都待提高<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2011-04-05

作者简介: 邵明省 (1980-), 男, 河南滑县人, 讲师, 硕士生, 主要从事信号处理、通信技术的研究。

本文提出二次裂变技术,针对权值较大的粒子进行裂变,把权值较小的粒子覆盖掉,裂变后的数目正比于原来的粒子群;同时设置裂变繁殖因子,保证种群的多样性和有效性,对粒子权值分配采取归一化,保持粒子群的多样性,有效克服了权值蜕化及样本枯竭等问题。实验仿真证实了算法的有效性,同时该方法误差小。

## 1 二次裂变粒子群算法描述

### 1.1 重采样算法

采样重要性重采样算法的引入是为了解决基本粒子群算法固有的粒子匮乏问题。其基本思想是通过用一组带有权值的粒子来近似盲信号的后验概率分布  $p(x_k | y_{1:k})$ ,从而获得盲信号的分离估计。令  $X_{0,k} = \{x_0, x_1, \dots, x_k\}$  表示  $k$  时刻的盲信号状态,  $k$  时刻的分离信号为  $Y_{0,k} = \{y_0, y_1, \dots, y_k\}$ 。新粒子由重采样函数  $x_k^i \sim q(x_k^i / x_{k-1}^i, y_k)$  产生,产生新的粒子群样本集  $(x_k^i)_{i=1}^N$ ,其中  $N$  为  $k$  时刻采样次数<sup>[4]</sup>。

$$p(x_k | y_{1:k}) \approx \sum_{i=1}^N w_k^i \delta(x_k - x_k^i) \quad (1)$$

式中  $\delta$  为狄拉克函数。

新的权值更新为

$$w_k^i \propto w_{k-1}^i \frac{p(y_k / x_k^i) p(x_k^i / x_{k-1}^i)}{q(x_k^i / x_{k-1}^i, y_k)} \quad (2)$$

这样得到一组带有权值的粒子群为  $\{x_k^i, w_k^i\}_{i=1}^N$ 。

虽然重采样控制粒子的权值退化,但引入了其他问题。因为重采样后粒子相互间不再独立,特别是只对大权值的粒子被采样多次,而其余的粒子对盲信号的分离几乎不起作用,粒子丧失了多样性,极端情况下,经过若干次迭代后,粒子只剩大权值粒子<sup>[5]</sup>。

### 1.2 裂变过程

在重采样的基础上对粒子进行裂变,具体操作为:将粒子集中的权值按照逐渐递减顺时针进行排序,将无序的随机数变为有序,使其成降序排列,减少了搜索算法的时间开销。参照有效粒子群中选取一定数目大权值的粒子进行裂变繁殖,繁殖后再生的粒子自粒子集权值的低端逆时针依次覆盖原小权值的粒子,相当于对大权值在原粒子及其再生粒子间进行平均分配,对原粒子及再生粒子的权值进行调整,同时裂变繁殖的子代粒子数正比于上代粒子的数。第一次裂变为利用随机抽样法获得分布的随

机粒子样本后,假设裂变  $(x_k^i, w_k^i)$  过程为

$$\left\{ \begin{matrix} x_k^i \\ w_k^i \end{matrix} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{matrix} \left\{ x_k^{i_1} \right\} \\ \left\{ w_k^{i_1} \right\} \\ \left\{ x_k^{i_2} \right\} \\ \left\{ w_k^{i_2} \right\} \\ \vdots \\ \left\{ x_k^{i_j} \right\} \\ \left\{ w_k^{i_j} \right\} \end{matrix} \right\} \quad (3)$$

$$\text{式中 } w_k^{(i_j)} = \frac{w_k^i}{\sqrt{\sum_{j=1}^j (w_k^{(i_j)})^2}}$$

粒子权值归一化:

$$w_k^{(i_j)} = \frac{w_k^{*(i_j)}}{\sum_{j=1}^N w_k^{*(i_j)}} \quad (4)$$

对盲信号预分离过程为

$$p(x_k | y_{k-1}) = \int p(x_k | x_{k-1}) p(x_{k-1} | y_{k-1}) dx_{k-1} \quad (5)$$

式(5)表示在得到新的分离值前,对预期分离值的预测概率。

更新过程为

$$p(x_k | y_k) \propto p(y_k | x_k) p(x_k | y_{k-1}) \quad (6)$$

式(6)表示在得到新的分离值后,更新的粒子群概率。

第一次裂变后,不是在原来的粒子种群中直接增加裂变粒子数目,而是从小权值粒子开始进行覆盖;但被选中的大权值粒子群中仍存在权值的大小之分,没有考虑其本身权值大小所代表的意义,即将所有符合基本条件的粒子平均化,没有很好地贴近真实状态,忽略了部分信息;同时为了保持种群的多样性,防止裂变后整个粒子群中只有较大权值粒子,即保证算法能使所有的个体自始至终都有机会参与采样,从第一次裂变粒子群的个体中直接裂变成新的个体,其粒子权值完全不同于第一次裂变形式。二次分裂能系统地覆盖到状态空间的每一个粒子,增大每一个粒子都有被覆盖的可能性,保证在粒子群模型上不产生空洞,而不是仅仅覆盖小权值粒子,每个粒子的权重取决于第一次分裂的权值,即使其权重小于所有粒子的平均权重,也有可能在二次分裂的重采样中被挑选出来作为新的样本集粒子,使状态空间的多样性增加<sup>[6]</sup>。

第二次裂变为

$$\begin{cases} (x_k^i, w_k^i) = [x_k^i, w_k^i / \sum_{j=1}^N w_k^j] \\ (x_k^j, w_k^j) = [x_k^j, w_k^j / \sum_{j=1}^N w_k^j] \\ \vdots \\ (x_k^N, w_k^N) = [x_k^N, w_k^N / \sum_{j=1}^N w_k^j] \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

式中  $\sum_{i=1}^m (w_k^i / \sum_{j=1}^N w_k^j) = 1$ 。

将新分裂粒子重抽样出  $p$  个粒子记为  $N_p$ , 对所有粒子权重进行归一化:

$$\bar{\omega}_{k,m}^i = \omega_{k,m}^i / \sum_{i=1}^{N_p} \omega_k^i \quad (8)$$

粒子群的变化增加了样本集的多样性, 克服了样本贫化问题, 但需对裂变粒子数目进行控制, 若二次裂变数目过多, 这将会增加算法的运算量, 因此需对裂变因子参数进行控制; 同样随着二次裂变粒子数的增加, 粒子群收敛的变化率为非均匀, 为了控制数据处理的时效性, 在增加有限粒子数的条件下, 当粒子数越过某个限后, 即使再增加大量的粒子数, 对盲信号的分离能力提高几乎不起任何作用, 此时处理数据已无意义, 必须对粒子群繁殖的有限收敛界进行控制<sup>[7]</sup>。

假定二次裂变粒子的盲信号算法估计误差某个指标为  $E$ ,  $\pm \Delta N_s$  为  $s$  个粒子裂变的数目  $N_s$  变化量,  $E^+$  为粒子数目增量  $\Delta N_s$  的统计估计误差;  $E^-$  为粒子数目增量  $-\Delta N_s$  的统计估计误差, 采用广义似然比检验定律, 设定无穷小的正数  $\delta$ , 若

$$\lim_{\substack{E^+ \rightarrow 0 \\ E^- \rightarrow 0}} \left| \frac{\|E^+\|}{\|E^-\|} - 1 \right| \leq \delta \quad (9)$$

则认定此时的  $N_s$  为有限收敛界。

在对算法程序的调试过程中, 种群裂变收敛界的选择很重要。如果选择的较大, 则分离的效果就不理想; 如果较小, 则必须要增加迭代的步数, 导致计算量增大, 因此需对裂变收敛界进行控制。增设收缩因子解决了在低维及低迭代次数时算法效率低的缺陷, 使粒子群保持多样性并具有更好的收敛率。

假定种群多样性函数为

$$\text{diversity}(\phi) = \frac{1}{|\phi||R|} \cdot \sum_{i=1}^{|\phi|} \sqrt{\sum_{j=1}^n (P_{ij} - \bar{P}_i)^2} \quad (10)$$

式中:  $\phi$  为种群;  $|\phi|$  为种群所含粒子的个数;  $|R|$  为搜索空间的最长半径;  $\Omega$  为问题的维数;  $P_{ij}$  为第  $i$  个粒子的  $j$  个分量;  $\bar{P}_i$  为所有粒子第  $i$  维的平均值。

若  $\text{diversity}(\phi) \geq 1$ , 则进行收缩, 种群多样性符合数据处理要求, 种群不再向有限收敛界进行靠近, 而是远离该界。

若  $0 < \text{diversity}(\phi) < 1$ , 则进行扩展, 种群多样性逐步增大, 直至达到有限收敛界时, 从而种群又开始向整体最优位置靠拢<sup>[8]</sup>。这样不仅提高算法的收敛速度, 还能避免算法的早熟现象, 快速准确地求出所有全局最优解, 使收敛速度和分离效果都有提高, 且分离误差小。

### 1.3 盲信号分离模型

为实现盲信号分离, 通常假设  $t$  时刻相互独立的盲源信号个数  $S_t$  已知, 且不大于分离输出信号的个数, 有

$$\mathbf{x}_t = \mathbf{A} \mathbf{S}_t \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{A}$  为混合矩阵;  $\mathbf{S}_t = s_{t(1:n,k)}$  和  $\mathbf{x}_t = x_{t(1:m,k)}$  分别为  $n$  路源信号向量与  $m$  路观测向量。

采用  $n \times m$  的分离矩阵  $\mathbf{B}$ , 使变换后的输出  $\mathbf{y}_t$  是源信号  $\mathbf{S}_t$  估计, 使系统输出向量

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{B} \mathbf{x}_t + \boldsymbol{\omega}_k \quad (12)$$

式中  $\boldsymbol{\omega}_k = \omega_{1:m,k}$  为观测噪声, 一般假设其值为  $0^{[9-10]}$ 。

根据中心极限定律, 相互独立的随机变量具有有限的均值和方差:

$$\mathbf{S}_{t(\alpha,\beta)}(\alpha, \beta) = s_\alpha(\alpha) s_\beta(\beta) \quad (13)$$

即使  $\mathbf{S}_t$  为任何分布, 但混合后的信号接近高斯分布, 当盲信号的非高斯性最大时, 达到了分离<sup>[11-12]</sup>, 即

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{DPS}_t = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & L \\ 0 & b & 0 & L \\ 0 & 0 & c & L \\ L & L & L & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & L \\ 1 & 0 & 0 & L \\ 0 & 0 & 1 & L \\ L & L & L & L \end{bmatrix} \cdot \mathbf{S}_t \quad (14)$$

式中:  $\mathbf{D}$  为对角矩阵;  $\mathbf{P}$  为置换矩阵(将单位矩阵任两行互换得到)。

分离误差  $ECT$ :

$$ECT = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^n \frac{|D_{ij}|}{\max_k |D_{ik}|} - 1 \right) + \sum_{j=1}^n \left( \sum_{i=1}^n \frac{|P_{ij}|}{\max_k |P_{kj}|} - 1 \right) \quad (15)$$

如果  $ECT$  越小,则分离效果越好。采用基于二次裂变粒子群算法的盲信号处理方法的具体步骤如下:

1) 粒子群初始化,由初始概率密度函数生成粒子群  $\{x_0^{(i)}, w_0^{(i)}\}_{i=1}^N$ 。

2) 根据盲信号的模型产生第一次裂变粒子群  $\{x_k^{(i)}\}_{i=1}^N$ 。

3) 判断是否处于有限收敛界,若是则停止裂变,根据粒子权值  $w_k^{(i)}$ ,对粒子  $\{x_k^{(i)}\}_{i=1}^N$  进行重采样,否则执行第二次裂变。

4) 对第二次裂变的数目进行  $\text{diversity}(\phi)$  函数判断,进行相应扩展或者收缩运算,根据粒子权值  $w_k^{(i)}$ ,对粒子进行二次重采样。

5) 得到分离结果。

## 2 实验仿真

仿真平台为 Windows 操作系统,采用 Matlab7.0 工具完成程序。图1为输入观测声音,不同的声音波形及特性有明显区别。随机产生的混合矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 0.9501 & 0.4516 & 0.4236 \\ 0.2319 & 0.8935 & 0.0197 \\ 0.6138 & 0.7516 & 0.8216 \end{bmatrix} \quad (16)$$

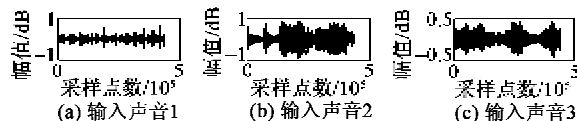


图1 输入观测声音

对图1中的3个语音信号进行混合,得到混合观测信号如图2所示。

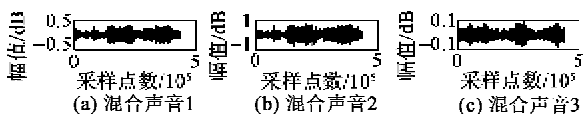


图2 混合声音

用基本粒子群算法对混合信号进行盲分离,粒子种群的规模为100,通过重采样后得到的结果如图3所示。

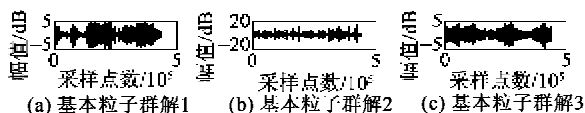


图3 基本粒子群算法下的分离解

在基本粒子群算法基础上二次裂变优化算法对混合信号进行盲分离时,种群规模也为100,控制每次裂变数目为原来的2倍,经过 Matlab7.0 仿真的

分离结果如图4所示。从分离效果上可看出,杂音基本被排除,效果明显,分离信号表征了源信号的主要特征,分离效果较好。

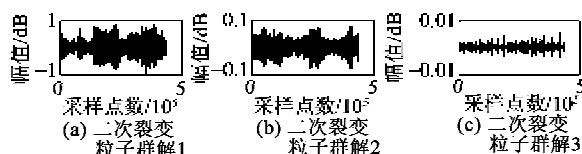


图4 二次裂变粒子群算法下的分离解

仿真运行得到的  $ECT$  变化曲线如图5所示。由图可见,二次裂变粒子算法明显优于本文其他粒子群算法,分离误差最终分别为 2.813、1.538、0.426,在同样的粒子数目下二次裂变粒子算法分离误差最小。虽然以上数据是一次仿真的结果,但经多次蒙特卡罗仿真后发现,  $ECT$  变化曲线与此相似。

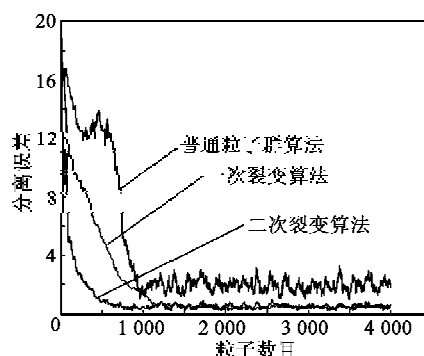


图5  $ECT$  变化

## 3 结束语

在盲信号分离领域,本文国内首次创立二次裂变技术,把大权值粒子裂变,覆盖掉小权值粒子;同时裂变数目正比于原来的粒子群,对粒子权值分配采取归一化,保持粒子群的多样性,有效克服了一次裂变技术的权值蜕化及样本枯竭等问题,解决了基本粒子群易陷入局部最小点及稳定性差的缺点,较好地分离盲信号。另外在二次分裂技术上,如何进行数据优化,将是未来粒子群改进技术研究的热点方向。

## 参考文献:

- [1] 刘丽芳. 粒子群算法的改进及应用[D]. 山西: 太原理工大学, 2008: 2-3.
  - [2] 魏秀业. 基于粒子群优化的齿轮箱智能故障诊断研究[D]. 山西: 中北大学, 2009: 1-5.
  - [3] 程水英, 张剑云. 裂变自举粒子滤波[J]. 电子学报, 2008, 36(3): 500-503.
- CHENG Shuiying, ZHANG Jianyun. Fission bootstrap

- particle filtering[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(3):500-503.
- [4] 董春利,董育宁,刘杰. 基于粒子滤波和 GVF-Snake 的目标跟踪算法[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(4):828-833.  
DONG Chunli, DONG Yuning, LIU Jie. Object tracking algorithm based on particle filtering and GVF-Snake[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(4):828-833.
- [5] 张红燕,谢跃雷,欧阳缮. 平坦衰落信道下一种基于进化粒子滤波的盲检测器[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(6):1413-1415.  
ZHANG Hongyan, XIE Yuelei, OUYANG Shan. A blind evolutionary particle filtering detector in flat fading channels[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(6):1413-1415.
- [6] 卢笑,孟正大. 陪护机器人粒子滤波定位法中重采样算法研究[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(4):54-57.  
LU Xiao, MENG Zhengda. Research of particle filter resampling algorithm in indoor service robot localization[J]. Computer Technology and Development, 2010, 20(4):54-57.
- [7] 程水英,张剑云. 粒子滤波算法中的有限收敛界[J]. 数据采集与处理, 2008, 23(4):481-485.  
CHENG Shuiying, ZHANG Jianyun. Limited convergence bound in particle filtering algorithms[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2008, 23(4):481-485.
- [8] 易云飞,陈国鸿. 一种基于收缩因子的改进粒子群算法[J]. 软件导刊, 2009, 8(9):59-60.  
YI Yunfei, CHEN Guohong. A shrinking factor based on improved particle swarm algorithm[J]. Software Guide, 2009, 8(9):59-60.
- [9] 由科军. 盲信号分离算法研究[D]. 陕西:西安电子科技大学, 2009:9-10.
- [10] 金乃高,殷福亮. 一种基于粒子滤波的双模态语音提取方法[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(4):596-601.  
JIN Naigao, YIN Fuliang. Bimodal speech extraction method based on particle filtering[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2008, 48(4):596-601.
- [11] 吴新杰,崔春阳. 基于粒子群算法的盲源信号分离[J]. 辽宁大学学报:自然科学版, 2009, 36(2):125-128.  
WU Xinjie, CUI Chunyang. Blind source separation based on particle swarm optimization[J]. Journal of Liaoning University: Natural Sciences Edition, 2009, 36(2):125-128.
- [12] 尉宇,刘振兴,李宁,等. 改进的粒子群算法及其非线性盲源分离[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 8(1):138-142.  
WEI Yu, LIU Zhenxing, LI Ning, et al. Nonlinear blind source separation using improved particle swarm optimization[J]. Aerospace Electronics Information Engineering and Controls, 2006, 8(1):138-142.
- 
- (上接第 142 页)
- [8] 侯育冬,崔磊,王赛,等. BiAlO<sub>3</sub> 基高温无铅压电陶瓷的研究进展[J]. 无机材料学报, 2010, 25(3):225-229.  
HOU Yudong, CUI Lei, WANG Sai, et al. Progress in research on BiAlO<sub>3</sub>-based high temperature lead-free piezoelectric ceramics[J]. Journal of Inorganic Materials, 2010, 25(3):225-229.
- [9] 刘超英,刘心宇,江民红.  $(1-x)\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3-x\text{BiNiO}_3$  无铅压电陶瓷的制备与性能[J]. 压电与声光, 2010, 32(5):863-866.  
LIU Chaoying, LIU Xinyu, JIANG Minhong. The preparation and properties of  $(1-x)\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3-x\text{BiNiO}_3$  lead-free piezoelectric ceramics[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2010, 32(5):863-866.
- [10] ZHANG Suwei, ZHANG Hailong, ZHANG Boping, et al. Dielectric and piezoelectric properties of  $(\text{Ba}_{0.95}\text{Ca}_{0.05})(\text{Ti}_{0.88}\text{Zr}_{0.12})\text{O}_3$  ceramics sintered in a protective atmosphere[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2009, 29(15):3235-3242.
- [11] LIU Wenfeng, REN Xiaobing. Large piezoelectric effect in Pb-free ceramics[J]. Physical Review Letters, 2009, 103(25):257602.