

# 改进快速独立成分分析在胎儿心电图提取中的应用\*

杜艳琴, 黄 华

## Application of a modified fast independent component analysis in fetal electrocardiogram extraction

Du Yan-qin, Huang Hua

### Abstract

**BACKGROUND:** Fetal electrocardiogram (FECG) is an objective index of the activities of fetal cardiac electrophysiology, but the obtained FECG is interfered by maternal ECG. How to extract the FECG quickly and effectively has become an important research topic.

**OBJECTIVE:** To separate FECG signal from the mother's ECG more rapidly and accurately by using improved fast (ICA) algorithm in order to achieve a more accurate FECG examination from fetal health purposes.

**METHODS:** Relaxation factor and the closeness measure function were added to fast ICA, the differences of speed and accuracy between the improved algorithm and the original ICA algorithm for rapid separation of the mother and FECG signal were observed.

**RESULTS AND CONCLUSION:** The simulation shows that the modified fast ICA can extract FECG from the mixed-signal quickly and efficiently and maintain the other signal simultaneously.

Du YQ, Huang H. Application of a modified fast independent component analysis in fetal electrocardiogram extraction. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu yu Linchuang Kangfu. 2010;14(26): 4809-4811. [http://www.crter.cn http://en.zgckf.com]

### 摘要

**背景:** 胎儿心电图是反映胎儿心脏电生理活动的一项客观指标, 获取的胎儿心电图受到母体心电的干扰, 如何快捷、有效提取出胎儿心电图成为重要的研究课题。

**目的:** 用改进的快速独立成分分析算法更快速、准确地将胎儿的心电从母体的心电信号中分离出来, 以便更准确研究胎儿心电图检查胎儿健康状况。

**方法:** 建立加入松弛因子和接近性度量函数的快速独立成分分析算法, 旨在观察改进后的算法与原始快速独立成分分析算法在分离母体胎儿心电信号时速度和准确性上的区别。

**结果与结论:** 实验结果表明, 改进后的快速独立成分分析方法能快速、有效从观察到的胎儿心电混合信号中分离出胎儿心电信号, 且同时保留了其他信号。

**关键词:** 快速独立成分分析; 胎儿心电; 参考信号; 松弛因子; 数字化医学

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2010.26.014

杜艳琴, 黄华. 改进快速独立成分分析在胎儿心电图提取中的应用[J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2010, 14(26):4809-4811. [http://www.crter.org http://cn.zgckf.com]

## 0 引言

胎儿心电图是反映胎儿心脏电生理活动的一项客观指标, 反映了胎儿在孕期的生长和健康状况。通常是在母体腹部测量胎儿心电, 获取的胎儿心电图受到很多噪声的干扰, 其中最主要的母体心电干扰的幅度是胎儿心电的2~10倍, 且频带互相重叠, 此外, 母亲的呼吸噪声、工频干扰、基线漂移等干扰都严重影响着胎儿心电图<sup>[1-2]</sup>。独立成分分析 (independent component analysis, ICA) 是一种统计和计算技术, 用于揭示随机变量、测量数据或信号中的隐藏成分<sup>[3]</sup>。ICA可以看成是主成分分析和因子分析的延展, 是一种新的信源分解技术, 它将观测信号按统计独立的原则通过优化算法分解为若干独立成分, 从而实现信号增强和分析<sup>[4]</sup>。胎儿

心电信号与母体心电信号、其他干扰信号是不同的生理活动, 可以认为它们是相互独立的, 符合ICA的条件, 本文提出了改进的FICA用于实现胎儿心电图的分离。

## 1 Fast ICA基本理论和算法

ICA作为一种统计方法, 它可以将观察到的随机数据表示为相互之间统计独立的一些成分的线性变换, 然后按照统计独立的原则, 采用某种特定的优化准则将其中的独立分量一一分解出来。

ICA的线性组合模型为:  $x=As$

式中 $x$ 表示观测到的 $n$ 个随机变量 $x_1, \dots, x_n$ 的混合向量,  $s$ 为由 $m(m \geq n)$ 维统计独立的信号分量构成的信号向量,  $A$ 为 $m \times n$ 维混合矩阵。

独立成分分析的目的在于在系数矩阵 $A$ 和独立

Department of Medical Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China

Du Yan-qin\*, Studying for master's degree, Department of Medical Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China duyanqin@126.com

Correspondence to: Huang Hua, Doctoral supervisor, Professor, Department of Medical Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan Province, China hhua@scu.edu.cn

Received: 2010-01-24 Accepted: 2010-05-05

四川大学医学信息工程系, 四川省成都市 610065

杜艳琴\*, 女, 1987年生, 四川省南充市人, 汉族, 四川大学在读硕士, 主要从事医学仪器与医学信号的研究。duyanqin@126.com

通讯作者: 黄华, 博士生导师, 教授, 四川大学医学信息工程系, 四川省成都市 610065 hhua@scu.edu.cn

中图分类号: R318  
文献标识码: B  
文章编号: 1673-8225 (2010)26-04809-03

收稿日期: 2010-01-24  
修回日期: 2010-05-05  
(20100124004/WLZ)

信号源  $s$  未知的情况下寻找出一个分解矩阵  $W$ , 将观测信号  $x$  中相互独立的信号源  $s$  的各分量分离, 使分离后的输出:  $Y=Wx$  是信号源  $s$  的一个良好的估计。

Fast ICA 算法使用负熵作为非高斯性的度量,

$$J(y)=[E\{G(y)\}-E\{G(v)\}]^2$$

式中  $G$  可以是任意的非二次函数,  $v$  和  $y$  是具有相同均值和协方差矩阵的高斯变量。

Fast ICA 算法是基于负熵判据的不动点迭代算法, 目的是选取合适的  $w$  使  $J(y)$  达到最大。其基本算法为:

$$w \leftarrow -E\{zg(w^T z)\} - E\{g'(w^T z)\} w$$

$$W \leftarrow W / \|W\|。$$

## 2 改进的Fast ICA算法

2.1 引入松弛因子的Fast ICA算法 基本的Fast ICA 算法迭代次数较多且对初始权值敏感, 因此这里引入利用梯度法改进的修正因子, 得到改进的算法<sup>[5]</sup>。

在迭代公式中引入松弛因子, 迭代公式如下:

$$w_{p+1} = w_p - \alpha_p \frac{E\{xg(w_p^T x)\} - \beta w_p}{E\{g'(w_p^T x)\} - \beta} \quad (1)$$

由于负梯度方向就是函数值下降最快的方向, 因此可选择将梯度值作为松弛因子, 计算  $E\{xg(w_p^T x)\}$  在  $w$  处的梯度值

$$\alpha = \begin{pmatrix} \frac{\partial E\{xg(w_p^T x)\}}{\partial w_p} & 0 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & \frac{\partial E\{xg(w_p^T x)\}}{\partial w_p} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中  $\frac{\partial E\{xg(w_p^T x)\}}{\partial w_1} = E\{x_p^2 g'(w_p^T x)\}$  ,

调整迭代公式得改进后算法如下:

$$w' \leftarrow E\{zg(w^T z)\} + \alpha E\{g'(w^T z)\} w$$

$$w'' \leftarrow E\{zg(w^T z)\} + E\{g'(w^T z)\} w$$

$$w \leftarrow w'' / \|w''\|$$

2.2 引入接近性度量函数的Fast ICA算法 在Fast ICA 算法中引入度量函数  $\varepsilon(\cdot)$ , 记与  $y_i$  有关的参考信号

为  $r^{[6]}$ 。在负熵对比度函数中乘以一个  $\varepsilon\{y \cdot r\}$ , 得到最优优化问题:

$$\max J(w) = [E\{G(y)\} - E\{G(v)\}]^2 \cdot \varepsilon\{y \cdot r\}$$

当  $\varepsilon\{y \cdot r\} = [E\{y \cdot r\}]^2$  时, 其提取一个感兴趣的源信号  $y_i$  的算法变为<sup>[7]</sup>

$$w \leftarrow [E\{y \cdot r\}] E\{zg(w^T z)\} - E\{g'(w^T z)\} E\{y \cdot r\} E\{z \cdot r\}$$

## 2.3 结合松弛因子和接近性度量函数的Fast ICA算法

在引入参考信号的Fast ICA 算法中加入松弛因子, 使分离出的成分更准确, 算法速度更快, 具体的算法步骤如下:

- ①对观测信号  $x$  进行中心化、白化处理。
- ②选择一个具有单位范数的初始化(可随机选取)向量  $w$ 。
- ③按照公式②更新松弛因子  $\alpha$ 。
- ④更新  $w$ ,

$$w' \leftarrow [E\{y \cdot r\}] E\{zg(w^T z)\} + \alpha E\{g'(w^T z)\} E\{y \cdot r\} E\{z \cdot r\}$$

$$w'' \leftarrow E\{zg(w^T z)\} + E\{g'(w^T z)\} w$$

- ⑤标准化  $w$ ,  $w \leftarrow w'' / \|w''\|$

## 3 仿真实验

对实验数据分别采用基本的Fast ICA 算法和改进的Fast ICA 算法进行实验。实验数据来自由Dirk Callaerts 发布的数据, 实验数据的采样频率为250 Hz、记录时间为10 s, 共有2 500个采样点。胎儿心率120次/min, 10 s中大约20个脉冲, 孕妇正常心率60~100次/min, 10 s中大约16个脉冲, 再通过观察Fast ICA 分离出的母体、胎儿心电信号的次锋得到参考信号  $r_1, r_2$ , 由窄的脉冲序列组成, 见图1。

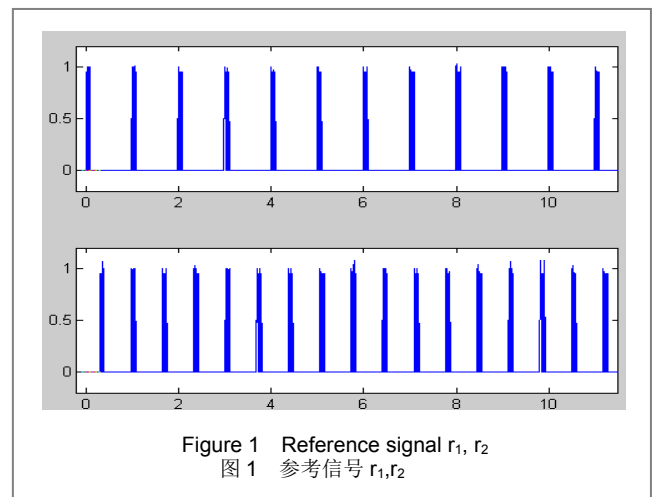


Figure 1 Reference signal  $r_1, r_2$   
图1 参考信号  $r_1, r_2$

混合的心电信号见图2, 用Fast ICA法进行成分分离后的信号见图3, 用本文中改进的FICA法进行成分分离后的信号见图4。

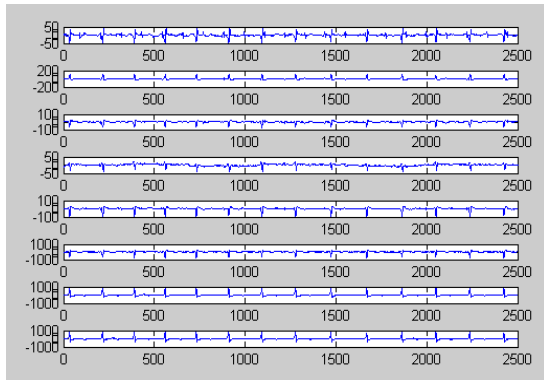


Figure 2 Mixed signal  
图2 混合信号

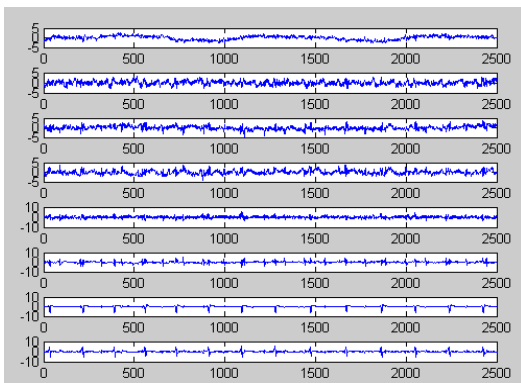


Figure 3 Fast independent component analysis processed signal  
图3 Fast ICA 处理后的信号

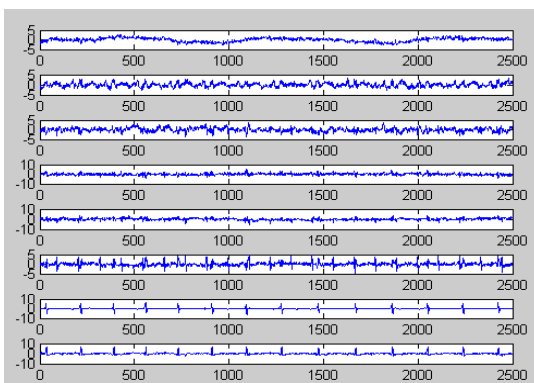


Figure 4 Improved fast independent component analysis signal processing  
图4 改进的 Fast ICA 处理的信号

实验仿真出的基本Fast ICA和改进后的Fast ICA算法的性能比较见表1。

表1 算法性能比较表  
Table 1 Comparisons of algorithm and performance

No.	Fast ICA		Improved fast ICA	
	Iteration number	Single time (s)	Iteration number	Single time (s)
1	29	1.482 5	16	1.982 5
2	25	1.181 7	17	1.653 4
3	26	1.239 7	14	1.793 1
4	27	1.264 5	12	1.804 5
5	32	1.205 3	18	1.776 4
6	28	1.188 7	15	1.645 9
7	27	1.498 3	12	2.369 7
8	23	1.096 6	15	1.561 8
9	28	1.167 7	19	1.710 2
10	26	1.316 3	17	1.907 2
Mean	27	1.264 1	15	1.820 4

ICA: independent component analysis

由表1可知, 基本的Fast ICA算法平均迭代次数为27次, 收敛时间为1.264 1 s, 而本文中的算法基本15次收敛, 平均所需时间为1.820 4 s。迭代次数明显下降, 收敛速度加快。而且本文算法中的信噪比约为28 dB, 而基本Fast ICA算法的平均信噪比为20 dB, 说明本文算法分离的效率和质量都更高。

**结论:** 在胎儿心电信号的采集过程中, 受到母体和其他噪声的强干扰, 但这些信号都是随机的, 不相关的, 如与脑电信号等是相互独立的, 符合ICA算法的要求。本文介绍了采用负熵作为独立估计准则的加入梯度因子和参考信号改进的Fast ICA方法在胎儿心电分离中的应用, 该算法的优点在于能有效的分离出与实验设计相关的独立成分, 且迭代次数较少。实验结果证明了改进的Fast ICA方法能有效地分离出母体胎儿心电, 实现胎儿心电信号的分离, 为胎儿的健康检测提供了更好的数据。

#### 4 参考文献

- [1] Yan CH, Zeng XP. Chongqing Gongxueyuan Xuebao: Ziran Kexueban. 2009;23(10):108-113.  
闫彩虹, 曾孝平. 基于ICA的胎儿心电信号提取算法的比较[J]. 重庆工学院学报:自然科学版, 2009, 23(10):108-113.
- [2] Liu QX, Wan H. Shengwu Yixue Gongcheng Yanjiu. 2007;26(1):37-41.  
刘清欣, 万红. 基于快速定点独立分量分析算法的母胎心电信号分离[J]. 生物医学工程研究, 2007, 26(1):37-41.
- [3] Peter Gruber, Anke Meyer-Bäse, Simon Foo, Fabian J. Theis. ICA, kernel methods and nonnegativity: New paradigms for dynamical component analysis of fMRI data. Institute for Bioinformatics and Systems Biology. 2009:497-504.
- [4] Zhou ZT, Dong GH, Xu X, et al. Beijing: Dianzi Gongye Chubanshe. 2007:274-315.  
周宗潭, 董国华, 徐昕, 等. 独立成分分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 274-315.
- [5] Xu BF, Luo XG, Peng CL, et al. Shengwu Yixue Gongchengxue Zazhi. 2009;26(4):766-770.  
徐彬锋, 罗小刚, 彭承琳, 等. 改进的Fast ICA算法在事件相关电位提取中的应用研究[J]. 生物医学工程学报, 2009, 26(4):766-770.
- [6] Lin QH, Zheng YR, Yin FL. Dalian Ligong Daxue Xuebao. 2006;46(6):915-919.  
林秋华, 郑永瑞, 殷福亮. 基于参考独立分量分析的语音增强方法[J]. 大连理工大学学报, 2006, 46(6):915-919.
- [7] Li CL, Liao GS, Li YJ. Huazhong Keji Daxue Xuebao: Ziran Kexueban. 2009;37(4):55-57.  
李昌利, 廖桂生, 李用江. 改进的参考独立分量分析算法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2009, 37(4):55-57.