

应用自相关和独立分量分析的胎儿心电信号提取

李朝兰^{1,2}, 方滨^{1,2}, 李慧杰^{1,3}, 王普^{3,4}

1. 北京工业大学电子信息与控制工程学院, 北京 100124; 2. 数字社区教育部工程研究中心, 北京 100124; 3. 城市轨道交通北京实验室, 北京 100124; 4. 计算智能与智能系统北京市重点实验室, 北京 100124

【摘要】目的:胎儿心电信号在监护胎儿健康状况过程中有着重要的作用。通常从孕妇腹部采集到的混合心电信号中提取出胎儿心电信号, 孕妇腹部信号是准周期性的时间信号, 其采样点存在着先后关系, 传统的独立分量分析(ICA)算法在分离过程中没有考虑信号的时间相关性, 针对这一问题提出了一种新的方法提取胎儿心电信号。**方法:**首先采用自相关分析可以得到混合信号具体的周期长度, 根据周期长度进行片段截取信号后可以去除其时间相关性, 再利用传统的FastICA分离截取信号得到ICA模型的模型参数, 最后利用此模型参数从完整的混合信号中提取出胎儿心电信号。**结果:**使用临床数据进行了实验验证, 分别使用传统的FastICA和新的方法提取胎儿心电信号, 结果表明采用新方法提取出的胎儿心电信号中母体成分干扰得到了很好的抑制, 胎儿心电信号比较清晰, 分离效果优于传统的FastICA。**结论:**该方法可以清晰地提取出胎儿心电信号, 在胎儿心电信号提取中具有很高的实用价值。

【关键词】胎儿; 心电信号; 母体腹部信号; 自相关; 独立分量分析

【中图分类号】R318

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2016)08-0838-06

Fetal electrocardiogram signal extraction based on autocorrelation and independent component analysis

LI Chao-lan^{1,2}, FANG Bin^{1,2}, LI Hui-jie^{1,3}, WANG Pu^{3,4}

1. School of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Engineering Research Center of Digital Community, Ministry of Education, Beijing 100124, China; 3. Beijing Laboratory for Urban Mass Transit, Beijing 100124, China; 4. Beijing Key Laboratory of Computational Intelligence and Intelligent System, Beijing 100124, China

Abstract: Objective Fetal electrocardiogram (ECG) signal plays an important role in monitoring the fetal health. The fetal ECG signal was usually extracted from the mixed ECG signal which was collected from the pregnant women's abdomen. The abdominal signal of pregnant women was a quasi-periodic time signal, and the sampling points had some certain sequence relationship. The traditional independent component analysis (ICA) algorithm did not consider the temporal correlation of signal in the process of separation. To solve this problem, a new method was proposed to extract fetal ECG signal. **Methods** The specific period length of the mixed signal was firstly obtained by using autocorrelation analysis. According to the period length, the signal was intercepted in a fragment, which could remove the temporal correlation. And the traditional FastICA was applied to separate the intercepted signal, and to obtain the model parameter of ICA model. Finally, the model parameter was used to extract fetal ECG signal from the complete mixed signal. **Results** The experiment was verified by clinical data. The traditional FastICA and the proposed method were separately used to extract fetal ECG signal. The results showed that the maternal component interference of the extracted fetal ECG signal was obviously suppressed by using the proposed method, and that the fetal ECG signal of proposed method was clearer, and that the separation effect of proposed method was better than that of traditional FastICA. **Conclusion** The proposed method can extract the fetal ECG signal clearly and has great practical value in the fetal ECG signal extraction.

Key words: fetal; electrocardiogram signal; maternal abdominal signal; autocorrelation; independent component analysis

【收稿日期】2016-03-25

【作者简介】李朝兰, 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 生物医学信号处理, E-mail: yglcl@sina.com

【通信作者】方滨, 男, 高级工程师, 硕士生导师, 研究方向: 信号处理、自动检测技术, Tel: 010-67392296, E-mail: fangbin@bjut.edu.cn

前言

胎儿心电信号能够反映胎儿心脏的电生理活动, 从中不仅能得到胎儿的平均心率和瞬时心率的变化, 而且可以从其描记的波形中得到更多的有关

胎儿健康和成长发育的相关信息。通过监测孕期胎儿的心脏活动,分析其心电波形,可以较早期地发现胎儿的异常状况,并及时采取相应的措施进行产前治疗,以降低胎儿的发病率和死亡率。通常是在母体腹部合适部位放置若干电极以采集到腹部混合信号,再从混合信号中提取出胎儿心电信号。孕妇腹部体表信号十分复杂,不仅包含了微弱的胎儿心电信号,还包括母体心电信号、呼吸、肌电等噪声,特别是在腹部检测到的体表信号中母体心电信号的幅值往往比胎儿心电信号大很多,这导致了胎儿心电信号的提取十分困难,因此研究出一种有效的提取出胎儿心电信号的方法是非常有意义的。

目前,学者们对胎儿心电信号提取进行了广泛的研究,提出了很多种方法,如匹配滤波法^[1]、自适应滤波法^[2-3]、人工神经网络^[4-5]、盲源分离法^[6-8]、独立分量分析法(Independent Component Analysis, ICA)^[9-11]等,其中ICA的分离效果较好,被认为是比较有应用前景的方法。研究者们提出了一些著名的ICA算法,能够实现非高斯信号的分离,其中快速固定点算法(FastICA)收敛速度快,在胎儿心电信号提取中得到了广泛应用。

母体体表信号是准周期的时间信号,信号本身有着时间上的相关性,但是传统的ICA在胎儿心电信号分离过程中没有考虑到这个相关性,会影响其分离效果。针对这一问题本文提出了一种结合自相关分析的方法进行片段截取混合信号以去除信号时间上的相关性,再利用基于负熵极大的FastICA进行胎儿心电信号提取。实验结果表明该方法能够提取出胎儿心电信号,分离效果优于标准的FastICA。

1 ICA模型

假设 n 维观测信号 X 是由 m 个相互独立的源信

号 S 经过线性混合而产生的,可表示为:

$$X = AS$$

上式就是ICA的基本模型,式中 A 是未知混合矩阵。图1给出了ICA模型原理框图。

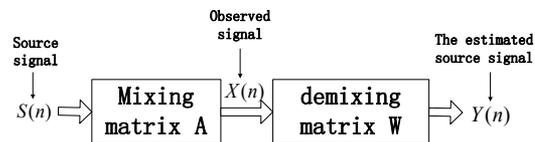


图1 ICA模型

Fig.1 Independent component analysis (ICA) model

ICA算法的目的是在仅能知道观测信号 X 的情况下,根据源信号 S 之间是相互独立的这一假设同时估计出未知的混合矩阵 A 和源信号 S 。

ICA的求解过程主要就是寻求合适的线性变换矩阵即解混矩阵 W 的过程,在运用ICA做信号分离过程中,有这样一个发现,当改变混合信号数值的顺序时,利用ICA分离改变顺序后的混合信号,其解混矩阵是相对稳定的。这里将给出一个实验进行说明。如图2所示的一组混合信号,该混合信号是由正弦信号和随机噪声信号按照一定的比例线性混合而成,现在需要从混合信号中将原始信号分离出来。

利用ICA算法对混合信号进行处理,得到此时的解混矩阵为 $W_1 = \begin{bmatrix} 0.6776 & -0.7354 \\ 0.7354 & 0.6776 \end{bmatrix}$ 。

此时对于混合信号 mix1 和 mix2 中的随机变量,若不改变它们的值的大小,将变量的顺序进行改变,注意这种顺序改变是观测到的两个混合信号同时调整顺序,得到新的混合信号 mix3 和 mix4,如图3所示,此时的混合信号已经没有了源信号的图形特征,信号完全被全部打乱,也就是说混合信号不再是由原始信号线性混叠而成。

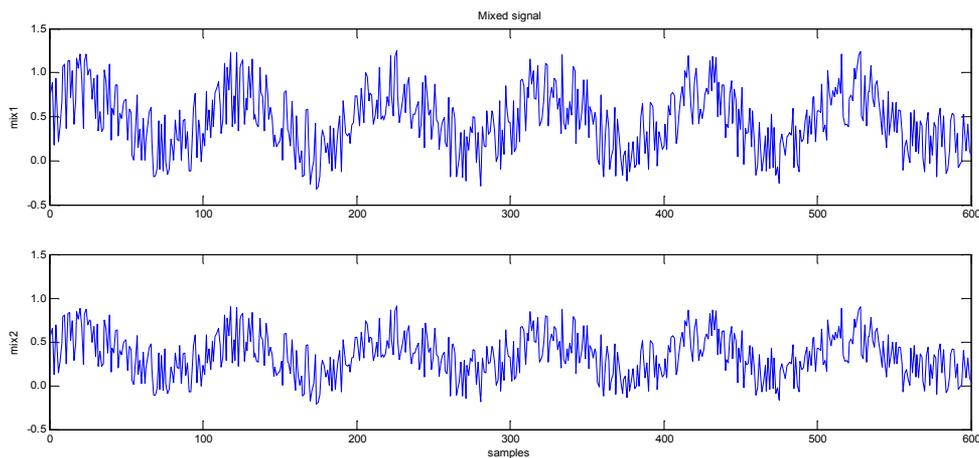


图2 原始混合信号

Fig.2 Original mixed signal

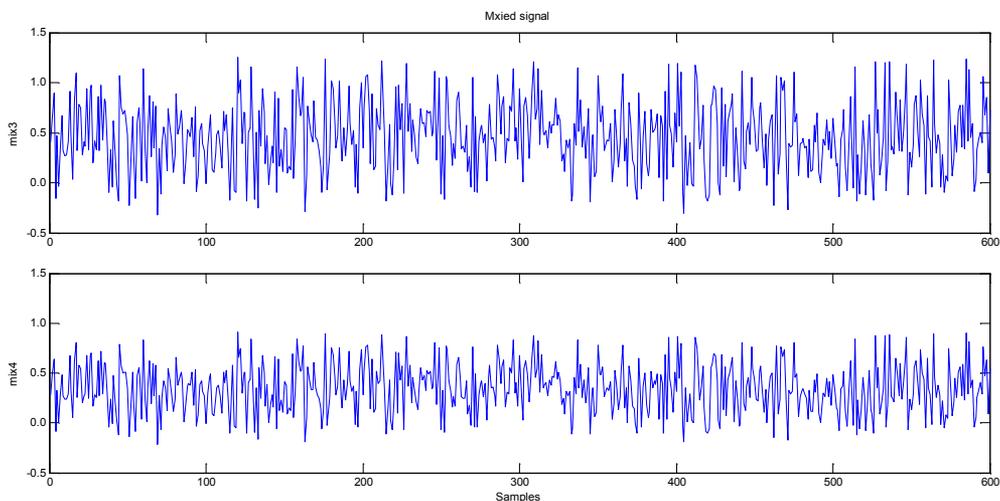


图3 新的混合信号
Fig.3 New mixed signal

将混合信号 mix3 和 mix4 使用 ICA 算法进行处理,得到解混矩阵的值: $W_2 = \begin{bmatrix} 0.6776 & 0.7354 \\ 0.7354 & -0.6776 \end{bmatrix}$ 。进行多组顺序调整并得到各自的解混矩阵,将这些解混矩阵按向量绘制到二维空间,得到其向量图如图 4 所示。

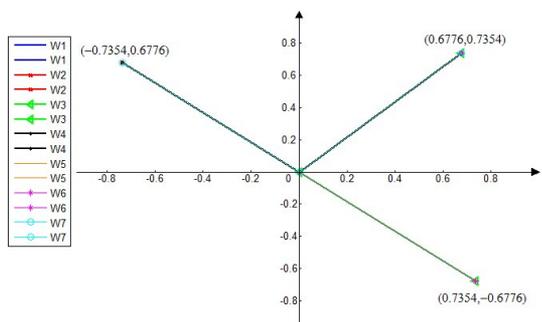


图4 解混矩阵对比图
Fig.4 Contrast figure of demixing matrix

通过对比几组信号经过 ICA 分离出原始信号后得到的解混矩阵 W ,从中可以看出当信号的顺序发生改变,但其数值未改变时,在进行迭代运算后得到的解混矩阵 W 的系数的绝对值是一样的,也有出现数值符号改变的情况,这是由于 ICA 算法本身存在的符号不确定性问题导致的。通过实验可以发现 ICA 模型在应用中的这样一个情况,当观测信号的值不变时,只改变其先后顺序,得到的解混矩阵是相对稳定的,也就是说在这一模型中没有考虑信号时间上相关性,对于观测信号的先后关系没有做过多的考虑。

2 本文方法描述

心电信号是一个时间信号,它在大部分时间里

基本上平稳的,只在心脏跳动时有明显的波动,并且呈现出周期性的变化。在分析时间信号的相关性中,信号的自相关分析可以提供很多关于信号的有用信息。信号 $x(t)$ 的自相关函数可以定义为^[12]:

$$r_x(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)x(t-\tau)dt$$

自相关函数反映了信号一个时刻的数据值同另一时刻的数据值之间的相互依赖关系。并且它具有的一个性质:周期信号的自相关函数也是周期函数,且两者的周期相同^[12]。由于母体腹部混合信号是周期性的时间信号,那么根据自相关的这一特性,可以得到其自相关函数也是周期变化的,因此可以考虑通过自相关分析得到信号的具体时间周期,进行信号的片段截取去除其时间上的相关性。

在利用自相关分析对信号进行周期截取去除其时间相关性后,使用分离算法进行胎儿心电信号提取,整个过程主要包括:中心化去均值、自相关分析截取信号、白化、FastICA 分离混合信号。具体提取步骤如图 5 所示。

2.1 母体腹部信号自相关分析

在 ICA 算法中通常是利用白化对观测信号进行预处理,这样可以去除混合信号间的线性相关性。但是在这一过程中并未去除信号时间上的相关性,根据第一节介绍,可以利用自相关分析对混合信号进行片段截取,这样截取出的混合信号的时间相关性就被削减了。对腹部混合信号进行自相关分析,实验数据是真实的临床心电数据,来源于 Physio-Net 中的 Abdominal and Direct Fetal ECG 数据库^[13],本节实验数据选用的是 r01_edfm 腹部信号,对 3 路串联信号进行自相关分析得到相关函数图如图 6 所

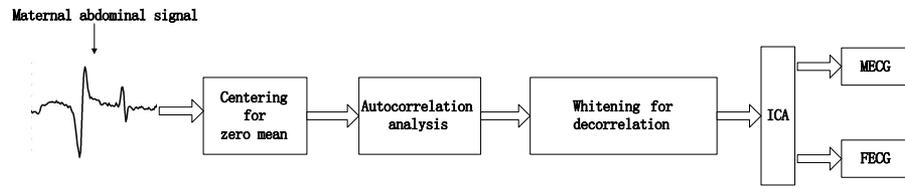


图5 信号提取步骤
Fig.5 Signalextraction steps

示。3路导联的相关函数是周期性的,并且周期是一致的,因此在本文实验过程中只需要对其中1路导联信号进行自相关分析就可以得到所需要的截取长

度,图7是其中一路导联信号片段截取后的自相关函数图,经过片段截取后,相关函数不再具有周期性的这一特点,时间上相关性得到了很大程度上的衰减。

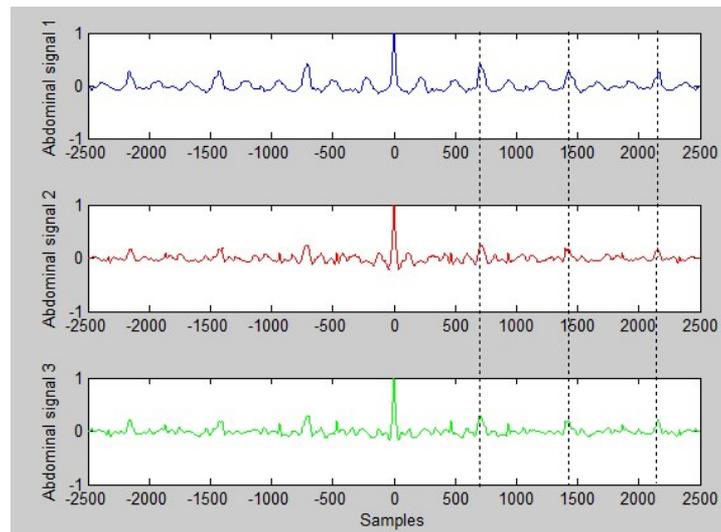


图6 3路导联信号自相关函数图
Fig.6 Autocorrelation function of three leads signals

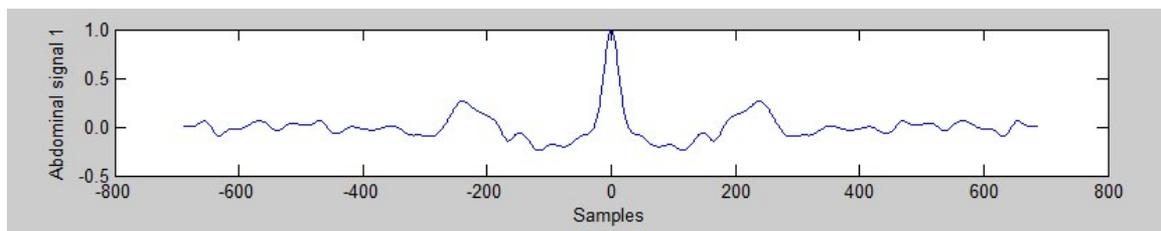


图7 1路导联截取信号自相关函数图
Fig.7 Autocorrelation function of one lead intercepted signal

2.2 基于负熵极大的FastICA算法分离混合心电信号

混合信号间的相关性对于信号的提取效果有影响,如果混合信号间的相关性越小,那么在ICA的迭代过程中就可以找到越精确的投影方向,此时源信号的提取效果就会越好^[14]。通过自相关分析截取到的混合信号的时间相关性已经比之未处理的大大减少了,再使用白化对数据进行预处理则其线性相关性也被去除了。然后根据ICA的一般过程对截取后的母体腹部信号进行分离,主要由两个阶段组成:迭代学习阶段和处理阶段。

迭代学习阶段应用基于负熵极大化的FastICA算法分离截取的片段信号,得到ICA模型的解混合矩阵。在这里将负熵用来度量变量的非高斯性。文献[15]中给出了基于负熵极大化的FastICA算法。负熵的估计公式如下:

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

式中,变量 v 是标准化过的,具有零均值单位方差的高斯变量;变量 y 也是具有零均值单位方差; G 是任意的非二次型函数。

根据牛顿法来求解目标函数,得到的最优解可

以推导出不动点迭代的基本公式:

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

迭代公式中的非线性函数 g 是非二次型函数 G 的导数,在本文实验中选择:

$$g(y) = y \exp(-\frac{ay^2}{2})$$

式中 a 取值为 1。

根据迭代公式进行计算,可以得到解混合矩阵。

处理阶段是实际信号的分离,经过上一阶段的求解,得到的解混矩阵 W 可以直接带入到 ICA 计算模型中,再把全部的腹部混合信号带入该模型,就可以提取出完整的胎儿心电信号。

3 实验及实验结果

在胎儿心电信号提取中,通常我们采用非入侵式检测方法从母亲腹部采集到混合信号,再根据算

法分离出胎儿心电。本文使用的真实临床心电数据库^[16]是通过采集系统从 5 个孕期在 38~41 周的孕妇得到的多路信号,每组数据包含从母体腹部采集到的 4 路腹部混合信号和 1 路从胎儿头部直接得到的胎儿心电信号,信号的采样频率为 1 000 Hz,分辨率为 16 位。在实验中选用了母体腹部信号进行研究,本节实验以 r01_edfm 腹部信号为实验对象,该临床实际数据中存在着较大的波动,首先需要对其滤波去除其基线漂移,然后再对数据进行分离。经过滤波处理后的 3 路导联腹部混合信号如图 8 所示。

首先用传统的 FastICA 分离混合信号,提取出的母体心电信号及胎儿心电信号如图 9 所示,图 9a 是提取出的母体心电信号,图 9b 是胎儿心电信号。从图中可以看出,通过这种方法母体心电很好的提取出来了,但是胎儿心电信号中仍然含有大量的母体心电,母体成分干扰影响很大。

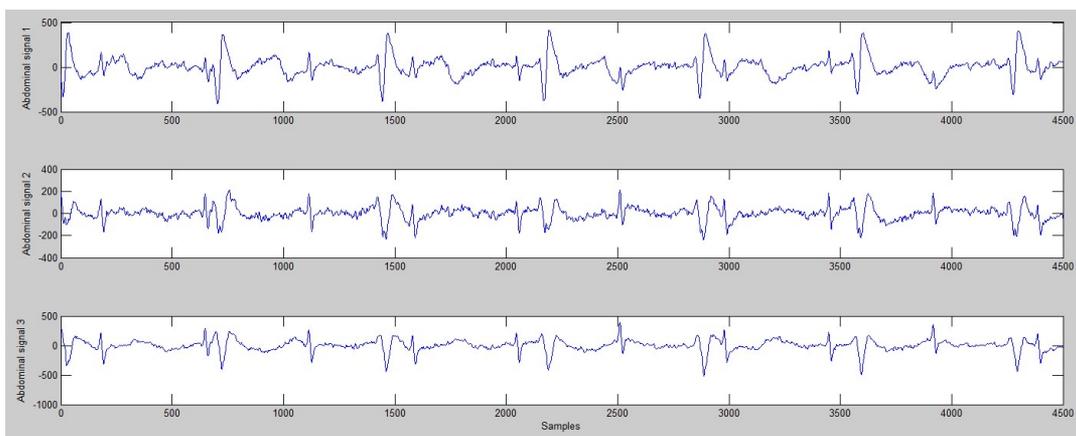
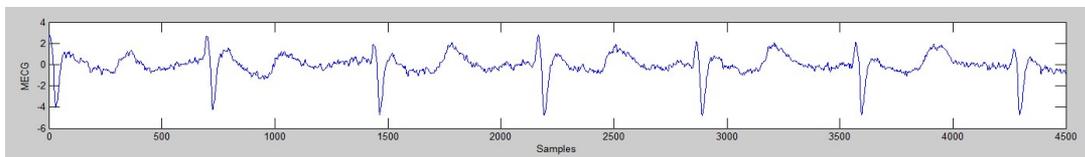
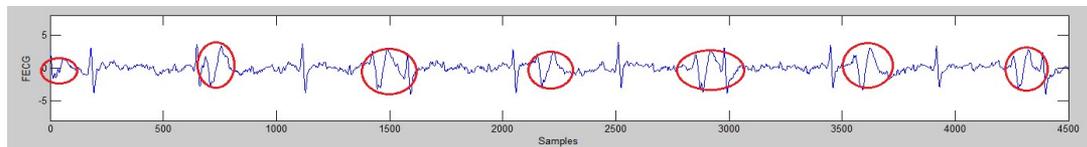


图8 3导联母体腹部信号

Fig.8 Three leads maternal abdominal signals



a: Maternal electrocardiogram (ECG) signal



b: Fetal ECG signal

图9 传统的FastICA提取出的心电信号

Fig.9 Extracted ECG signal by using traditional FastICA

采用本文方法进行信号提取,图 10 给出了提取出的母体心电信号(图 10a)和胎儿心电信号(图 10b),采

用此方法母体心电和胎儿心电都被提取出来了。对比两种方法提取出的胎儿心电信号,从图中可以观察到

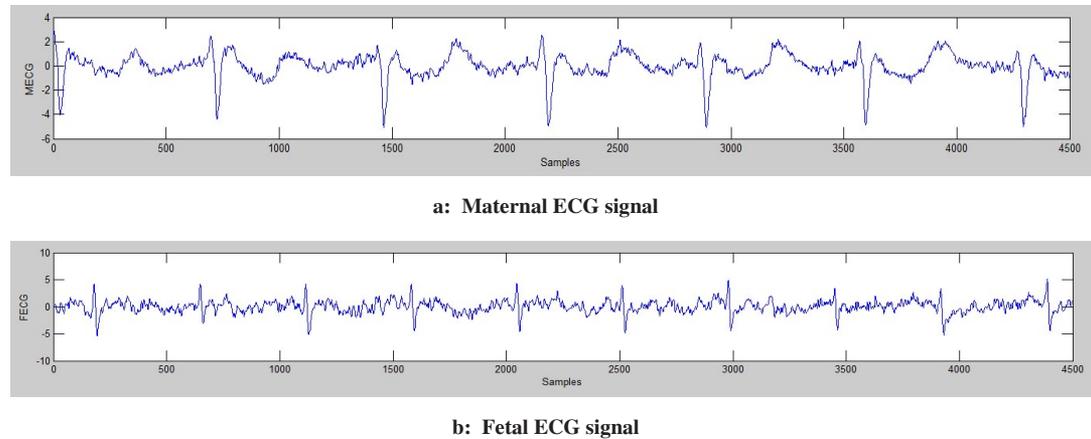


图10 本文方法提取出的心电信号

Fig.10 Extracted ECG signal by using the proposed method

用本文方法所分离的胎儿心电信号效果比传统方法的好,标准的FastICA算法提取出的胎儿心电中母体成分很明显(图中圆圈标出部分),而本文方法提取出的胎儿心电信号中母体心电成分得到了很好的抑制。

4 结论

本文在考虑了腹部混合信号间存在着时间相关性的基础上,结合自相关分析和ICA进行了胎儿心电信号的提取,使用临床心电数据分别对本文方法和传统的FastICA算法进行了实验验证,实验表明使用传统的FastICA算法分离出的胎儿心电信号中母体成分比较明显,干扰比较大,而本文方法比传统的FastICA效果好,分离出的胎儿心电信号中母体成分被很好的抑制了,提取出的胎儿心电信号比较清晰,具有很好的实用价值。虽然本文对胎儿心电信号的提取方法研究有了一定的成果,但是该方法只是在仿真平台上进行了验证,并未进行实时的胎儿信号提取,实际的实时临床验证还需要进一步的研究分析,下一步计划就是将该方法应用到实时胎儿心电信号提取系统中。

【参考文献】

- [1] 严文鸿, 蒋宁. 基于小波变换和匹配滤波的胎儿心电信号R波检测[J]. 中国医疗器械杂志, 2015, 39(5): 318-320.
YAN W H, JIANG N. Detection of R-wave in fetal ECG based on wavelet transform and matched filtering [J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2015, 39(5): 318-320.
- [2] KIRUTHIGA G, SHARMILA A, MAHALAKSHMI P. Enhancement of fetal ECG signal using adaptive noise cancellation[J]. Int J Pharma Biol Sci, 2015, 6(4): 943-950.
- [3] WU S, SHEN Y, ZHOU Z, et al. Research of fetal ECG extraction using wavelet analysis and adaptive filtering [J]. Comput Biol Med, 2013, 43(10): 1622-1627.
- [4] HASAN M A, IBRAHIMY M I, REAZ M B. Fetal ECG extraction from maternal abdominal ECG using neural network[J]. J Software Eng Appl, 2009, 2(5): 330-334.
- [5] HASAN M A, REAZ M B, IBRAHIMY M I. Fetal electrocardiogram extraction and R-peak detection for fetal heart rate monitoring using artificial neural network and correlation[C]. 2011 International Joint Conference on Neural Network (IJCNN), 2011: 15-20.
- [6] SUGUMAR D, VANATHI P T, MOHAN S. Joint blind source separation algorithms in the separation of non-invasive maternal and fetal ECG [C]. 2014 International Conference on Electronics and Communication Systems (ICECS), 2014: 121-137.
- [7] LUO D. Research and application of fetal electrocardiogram blind signal separation technology [J]. Res J Appl Sci Eng Technol, 2012, 4 (14): 2231-2235.
- [8] GHAZDALI A, HAKIM A, LAGHRIB A, et al. A new method for the extraction of fetal ECG from the dependent abdominal signals using blind source separation and adaptive noise cancellation techniques[J]. Theor Biol Med Model, 2015, 12(1): 1-20.
- [9] 赵治栋, 徐雯, 张晓红, 等. 基于改进FastICA的胎儿心电提取算法研究[J]. 传感技术学报, 2015, 28(9): 1275-1281.
ZHAO Z D, XU W, ZHANG X H, et al. Research of fetal ECG extraction based on modified FastICA algorithm [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(9): 1275-1281.
- [10] JAFARI M G, CHAMBERS J A. Fetal electrocardiogram extraction by sequential source separation in the wavelet domain [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2005, 52(3): 390-400.
- [11] IMMANUEL J J, PRABHU V, CHRISTOPHERAJ V J, et al. Separation of maternal and fetal ECG signals from the mixed source signal using FASTICA [J]. Procedia Eng, 2012, 30(4): 356-363.
- [12] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2000: 342-348.
ZHENG J L, YING Q Y, YANG W L. Signals and systems [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2000: 342-348.
- [13] GOLDBERGER A L, AMARAL L A, GLASS L, et al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals [J]. Circulation, 2000, 101(23): E215-E220.
- [14] 申丽岩, 方滨, 沈毅, 等. 改进的ICA胎儿心电信号提取法[J]. 计算机仿真, 2007, 24(5): 79-82.
SHEN L Y, FANG B, SHEN Y, et al. Fetal electrocardiogram extraction combining ICA and highpass filter [J]. Computer Simulation, 2007, 24(5): 79-82.
- [15] HYVARINEN A. Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis [J]. IEEE Trans Neural Netw, 1999, 10(3): 626-634.
- [16] KOTAS M, JEZEWSKI J, HOROBA K, et al. Application of spatio-temporal filtering to fetal electrocardiogram enhancement [J]. Comput Methods Programs Biomed, 2011, 104(1): 1-9.

(编辑: 薛泽玲)