

文章编号: 2095-4980(2013)04-0619-05

一种提取频移键控信号的独立分量分析算法

唐兴佳, 张秀方

(西安电子科技大学 理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对传统自然梯度 ICA 算法对移频轨道电路 FSK 信号提取的不稳定和精确度受限问题, 提出一种基于白化的变步长自然梯度 ICA 算法。仿真实验表明, 相比于传统的自然梯度 ICA 算法, 基于白化的变步长自然梯度 ICA 算法的串音误差曲线更平稳, 稳态误差值更小, 对 FSK 信号的检测和提取具有更稳定、准确的消噪性能。

关键词: 独立分量分析; 移频轨道电路; 频移键控信号; 可变步长; 正交修正

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201304.0619

An independent component analysis algorithm to extract Frequency-Shift Keying signal

TANG Xing-jia, ZHANG Xiu-fang

(Faculty of Science, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract: Due to the instability and the limited precision of traditional natural gradient Independent Component Analysis(ICA) algorithm to extract frequency shift track circuit Frequency-Shift Keying(FSK) signals, a kind of variable step-size natural gradient ICA algorithm is proposed based on whitening. According to the orthogonal constraint satisfied by separation matrix during whitening process, a kind of single-step orthogonal correction instead of whitening process is introduced. Then, a kind of single-step error estimation function is put forward based on the generalized degree of approximation between the separation matrix of each iteration and the optimal separation matrix. A nonlinear function is designed based on whitening to be the step-size adjusting function according to this error estimation. Simulation experiments indicate that the variable step-size natural gradient ICA algorithm based on whitening bears more stable and accurate de-noising performance for the detection and extraction of FSK signals compared with traditional natural gradient ICA algorithm.

Key words: Independent Component Analysis; frequency shift track circuit; Frequency-Shift Keying signal; variable step-size; orthogonal correction

对于国产移频轨道电路频移键控(FSK)信号, 通常采用滤波、频谱分析或信号变换等方法进行检测和提取^[1], 但干扰信号的存在, 极大影响了 FSK 信号的提取精确度。作为信号处理领域研究的热点之一, 独立分量分析(ICA)^[2] 可用来解决此类有干扰信号存在的 FSK 信号提取问题。ICA 起源于经典的鸡尾酒会问题, 即在多个语音相互重叠的情况下, 利用不同语音间相互独立来分离原始语音信号。ICA 算法主要分为批处理和自适应 2 类。批处理算法, 如 FastICA 算法^[2]、联合对角化方法^[2]等, 数值稳定性较好, 但不适用于观测数据时时更新的系统。自适应算法, 如 EASI 算法^[3]、自然梯度 ICA 算法^[2]等, 计算量较小, 且具有跟踪系统环境变化的能力, 但算法的稳定性受学习步长的影响较大。为了提高算法的稳定性和分离信号的准确性, 本文提出一种基于白化的可变步长, 并通过引入一种正交修正代替白化处理的算法。然后, 对含干扰的 FSK 信号进行仿真实验, 证明新算法的优越性。

1 自然梯度 ICA 算法

在 ICA 模型中, 观测信号来自一组传感器的输出, 每个传感器接收到的都是多个源信号的混合。 n 个信号源

发出的源信号 $s_i = (s_1(t), s_2(t), \dots, s_n(t))^T$ 通过传输通道被 m 个传感器接收, 得到观测信号 $x_i = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t))^T$ 。ICA 瞬时混合模型可表示为:

$$x_i = As_i + n_i \quad (1)$$

式中 A 为混合矩阵。在不考虑随机噪声 n_i 的情况下, 假设 A 具有足够的非奇异性, 则源信号也可看作观测信号的线性组合。这样, 求解 ICA 问题就是确定一个矩阵 W (称为分离矩阵), 使得矩阵变换:

$$y_i = Wx_i \quad (2)$$

可作为源信号 s_i 的估计, 并称 $y_i = (y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t))^T$ 为分离信号^[2]。因此, 求解 ICA 模型, 首先要对分离结果 Wx 的独立性(或非高斯性)做出度量, 然后以此度量函数为目标函数, 借助梯度下降等优化方法, 便可找到模型的解。

上述模型的基本假设是^[2]: 1) 源信号的各个分量相互独立, 且最多只有一个分量服从高斯分布; 2) 源信号的各个分量具有零均值和单位方差。还需注意的是, 在 ICA 模型中, 分离信号相对于源信号会出现顺序和幅度上的不确定。但由于 ICA 的主要目的是把源信号分离出来, 对分离信号的顺序并无要求, 且只需在分离信号前乘以适当的系数即可消除幅度的不确定, 因此, ICA 的这 2 种不确定性对最终结果的影响并不大。

基于互信息构造独立性度量函数, 并借助最速下降法构造自然梯度 ICA 在线学习规则为^[2,4]:

$$W(t) = W(t-1) + \eta(t)(I - G(y(t))(y(t))^T)W(t-1) \quad (3)$$

式中: $G(y)$ 为分值函数; $\eta(t)$ 为学习步长。通常情况, 由于源信号的概率密度函数未知, 因而, 分值函数也未知。实际应用中, 常用某个适当的单调奇函数作为激励函数来代替分值函数, 例如 $G(y) = y^3$ 或 $G(y) = y - \tanh(y)$ 。

2 基于白化的可变步长

在自然梯度 ICA 算法中, 学习步长 η 的选择对算法的收敛起着关键作用。 η 越大, 收敛速度越快, 但收敛后的稳态误差也就越大; η 越小, 收敛速度越慢, 同样会影响算法性能。好的学习步长选择与分离矩阵和最优值之间的误差有关。当分离矩阵远离其最优值时, 应增大 η 的取值, 以加快收敛速度; 当分离矩阵处于其最优值附近时, 应减小 η 的取值, 以减小算法的稳态误差。而且, 为使算法不发散, 还要限制 η 的取值范围。简单的方法是将学习步长定义为迭代次数的反比例函数或者指数下降函数, 但在时变环境下, 这种方法并不能保证算法的稳定收敛^[5]。

根据白化的定义, 将观测信号做白化处理, 就是对其做矩阵变换使得变换后的信号有单位方差, 即:

$$E\{Vx(t)x(t)^T V^T\} = VA E\{s(t)s(t)^T\} A^T V^T = VAIA^T V^T = VAA^T V^T \rightarrow I, \quad t \rightarrow \infty \quad (4)$$

式中 V 为白化矩阵。在 ICA 模型中, 分离矩阵 W 的在线学习类似于上述白化过程, 即 $W(t)A \rightarrow I$ 。由于白化过程可看作 ICA 的一部分, 结合公式(4)可将 $W(t)A \rightarrow I$ 写为对称形式:

$$W(t)AA^T W(t)^T \rightarrow I \quad (5)$$

前文分析指出, 学习步长的选择跟分离矩阵和最优值之间的误差有关, 因此, 通过引入分离矩阵 W 的误差估计, 可建立步长与误差估计之间的函数关系^[6]。首先, 将 $W(t)$ 到 A^{-1} 的广义近似程度式(5)定义为分离矩阵的误差估计:

$$E(t) = (I - W(t)AA^T W(t)^T) \quad (6)$$

考虑到 $E(t)$ 为矩阵, 为方便起见, 取 $E(t)$ 的 2 范数的平方作为实际的误差估计:

$$\hat{E}(t) = \|I - W(t)AA^T W(t)^T\|_2^2 \quad (7)$$

然后, 根据步长与误差之间的类指数关系, 可建立非线性函数(8)作为学习步长的调整函数:

$$\eta(t) = \alpha\{1 - \exp[-\beta\hat{E}(t)]\} \quad (8)$$

式中参数 α 和 β 通过实验调整选取最优值。为避免 $\eta(t)$ 过大导致算法发散, 假设 $\eta(t)$ 有上限: $\eta_{up} = 3\eta(0)$ 。需要强调的是, 上述可变步长是基于白化的。

3 无预白化的正交修正

ICA 的核心是通过恢复信号之间的统计独立性,实现信号分离,信号之间统计独立一定线性不相关,白化过程正是通过去除信号之间的相关性,使 ICA 变容易。在 ICA 的基本假设(源信号具有零均值和单位方差)下,限定分离矩阵的正交性约束,等价于观测信号为白化信号。传统的自然梯度 ICA 算法没有注意到这一点,使得分离矩阵的迭代过程不稳定,最终导致分离信号不准确。

事实上,源信号 \mathbf{s} 具有单位方差,则分离信号 \mathbf{y} 也应具有单位方差,即 $E\{\mathbf{y}\mathbf{y}^T\} = \mathbf{I}$ 。假设观测信号是白化的,即有 $E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^T\} = \mathbf{R}_x = \delta^2\mathbf{I}$, 于是:

$$E\{\mathbf{y}\mathbf{y}^T\} = E\{\mathbf{W}\mathbf{x}\mathbf{x}^T\mathbf{W}^T\} = \mathbf{W}E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^T\}\mathbf{W}^T = \mathbf{W}\mathbf{R}_x\mathbf{W}^T = \mathbf{W}(\delta^2\mathbf{I})\mathbf{W}^T = \delta^2\mathbf{W}\mathbf{W}^T = \mathbf{I} \quad (9)$$

式(9)表明,在分离信号 \mathbf{y} 和观测信号 \mathbf{x} 均为单位方差(不考虑 δ^2)的情况下,分离矩阵 \mathbf{W} 应是对称正交的。也就是说,分离矩阵的正交性约束等价于观测信号为白化信号。

考虑到观测信号 \mathbf{x} 不一定总满足单位方差,即,总是预白化处理过的,而且上述可逐步长正是基于白化设计的,因此,在不进行观测信号预白化时,可引入加权正交约束 $\mathbf{W}\mathbf{R}_x\mathbf{W}^T = \mathbf{I}$, 并通过在传统的自然梯度 ICA 算法后,进行分离矩阵 \mathbf{W} 的正交性修正,便可达到白化效果^[7-8]。为了跟踪数据的变化,并保持算法的实时性,本文考虑如下单步正交修正方法:

$$\mathbf{R}_x(t) = \frac{t-1}{t}\mathbf{R}_x(0) + \frac{1}{t}\mathbf{x}(t)\mathbf{x}(t)^T \quad (10)$$

$$\mathbf{W}(t) = \mathbf{W}(t) / \sqrt{\|\mathbf{W}(t)\mathbf{R}_x(t)\mathbf{W}(t)^T\|} \quad (11)$$

$$\mathbf{W}(t+1) = \frac{3}{2}\mathbf{W}(t) - \frac{1}{2}\mathbf{W}(t)\mathbf{R}_x(t)\mathbf{W}(t)^T\mathbf{W}(t) \quad (12)$$

4 仿真实验

移频轨道电路 FSK 信号是采用周期方波调制的移频信号,即载波频率随周期方波变化的移频信号,FSK 信号的时域表达式为:

$$s(t) = A_0 \cos[2\pi f_0 t + g(t)] \quad (13)$$

其中

$$g(t) = \begin{cases} 2\pi\Delta f t & 0 < t \leq \frac{T}{2} \\ 2\pi\Delta f (\frac{T}{2} - t) & \frac{T}{2} < t < T \end{cases} \quad (14)$$

式中: A_0 为 FSK 信号的振幅; $g(t)$ 为低频调制函数; Δf 为频率偏移量; T 为低频调制方波周期。假设 FSK 信号中混入如下调幅信号:

$$n(t) = [m + \cos(\omega_{11} + \phi)] \cos(\omega_{22} + \theta)t \quad (15)$$

式中: ω_{11} 和 ω_{22} 分别为调制频率和载频; m 为直流项; ϕ 和 θ 分别为调制频率和载频的初相位^[9]。为模拟环境变化,加入 $[-1,1]$ 上服从均匀分布的随机噪声信号。

本文实验中,使用 3 个观测感应器(即 $m=3, n=3$); 混合矩阵 \mathbf{A} 随机产生,且服从 $[-1,1]$ 上的均匀分布; FSK 信号的载频 $f_0=100\text{ Hz}$, 调幅信号的调制频率 $\omega_{11}=60\text{ Hz}$, 载频 $\omega_{22}=1000\text{ Hz}$, 初始步长 $\eta(0)=0.01$, 参数 $\alpha=0.01, \beta=0.1$; 信号的采样周期 $T_s=0.0001\text{ s}$; 算法的收敛稳定性能用“串音误差”来衡量^[10]:

$$Ect = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n \left[\sum_{q=1}^n \frac{|c_{pq}|}{\max_l |c_{pl}|} - 1 \right] + \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n \left[\sum_{p=1}^n \frac{|c_{pq}|}{\max_l |c_{lq}|} - 1 \right] \quad (16)$$

式中 $\mathbf{c}_{pq} = [\mathbf{W} \bullet \mathbf{A}]_{pq}$ 称为混合-分离系统的传递矩阵。

FSK 信号分离实验步骤如下:

- 1) 初始化分离矩阵 $\mathbf{W}(0) = \mathbf{I}_{n \times m}$, 协方差矩阵 $\mathbf{R}_x(0) = \mathbf{I}_m$, 学习步长 $\eta(0) = 0.01$;
- 2) 计算 $\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}(t)\mathbf{x}(t)$;
- 3) 更新学习步长 $\eta(t)$, 更新协方差矩阵 $\mathbf{R}_x(t)$, 更新分离矩阵 $\mathbf{W}(t)$;
- 4) 对分离矩阵 $\mathbf{W}(t)$ 进行单步正交修正;
- 5) 计算串音误差 $Ect(t)$;
- 6) 如果 $t \neq T$, 取 $t \leftarrow t+1$, 返回步骤 4), 否则, 迭代结束;
- 7) 依据 $\mathbf{y}(t)$ 和 $Ect(t)$ 绘制分离的源信号波形和算法性能曲线, 其中串音误差取运行 50 次的平均值。仿真实验的结果见图 1~图 4。

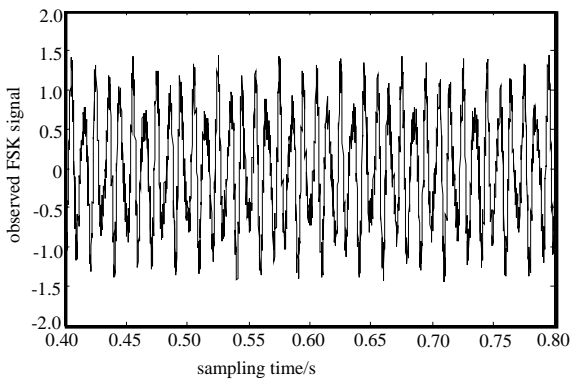


Fig.1 FSK observation signal waveform including interference
图 1 含干扰的 FSK 观测信号波形

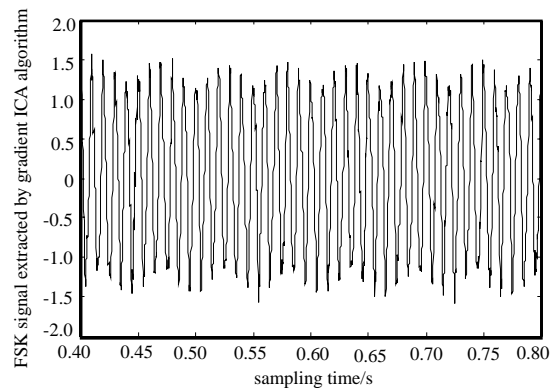


Fig.2 FSK signal waveform extracted by natural gradient ICA algorithm
图 2 自然梯度 ICA 算法分离的 FSK 信号波形

从图 2 和图 3 可以看出, 自然梯度 ICA 算法可以对含干扰的 FSK 信号进行较为有效的分离, 但分离精确度明显不高。相比之下, 基于白化的变步长自然梯度 ICA 算法分离的 FSK 信号则要准确很多。由图 4 可以看出, 自然梯度 ICA 算法的收敛稳定性能曲线在迭代相对稳定后存在较大跳跃, 这意味着算法很不稳定。基于白化的变步长自然梯度 ICA 算法基本消除了这一跳跃, 算法更稳定, 且稳态误差更小。因此, 基于白化的变步长 ICA 算法对 FSK 信号的提取更准确, 更稳定。

同时, 从变步长 ICA 算法和基于白化的变步长 ICA 算法的性能曲线对比可以看出, 单一的变步长会造成算法收敛慢, 而基于白化的变步长 ICA 算法收敛则很快, 且稳态误差很小, 说明本文的单步正交修正方法可靠。

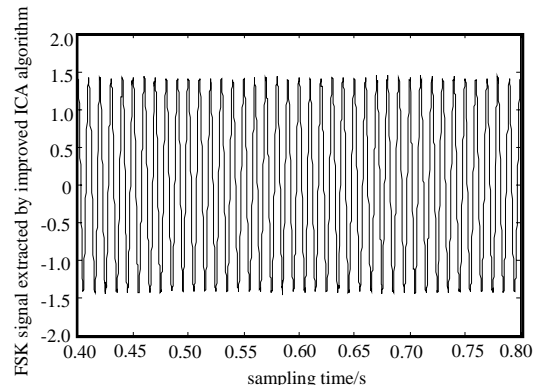


Fig.3 FSK signal waveform extracted by variable-step orthogonal gradient ICA algorithm
图 3 基于白化的变步长自然梯度 ICA 算法分离的 FSK 信号波形

5 结论

在移频轨道电路 FSK 信号提取过程中, 针对传统自然梯度 ICA 算法的不稳定和分离信号的不准确, 引入加权正交约束和单步正交修正, 设计出一种基于白化的变步长自然梯度 ICA 算法。仿真实验表明, 基于白化的变步长自然梯度 ICA 算法相比传统的自然梯度 ICA 算法在 FSK 信号检测和提取中具有更稳定和准确的消噪性能。

参考文献:

- [1] 何婕, 何小海, 滕奇志, 等. 一种 AM 调幅-2FSK 调频通信系统的研究[J]. 信息与电子工程, 2004, 2(1): 21-25. (HE Jie, HE Xiaohai, TENG Qizhi, et al. Study on AM-2FSK Modulation Communication System[J]. Information and Electronic Engineering,

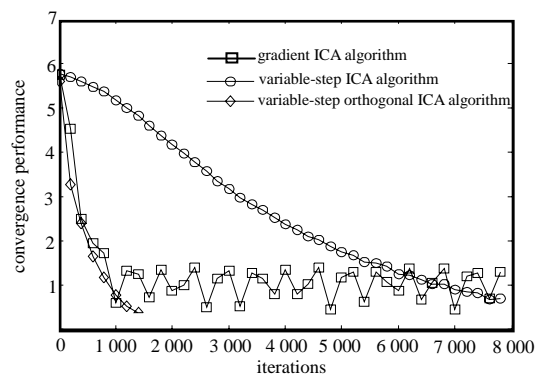
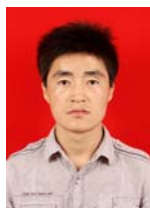


Fig.4 Convergence stability performance before and after improvement
图 4 改进前后算法的收敛稳定性能曲线

2004,2(1):21-25.)

- [2] Hyvarinen A, Karhunen J, Oja E. Independent Component Analysis[M]. New York:Wiley, 2001.
- [3] Cardoso J F, Laheld B. Equivariant Adaptive Source Separation[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996,45(2):434-444.
- [4] Amari S. Natural Gradient Works Efficiently in Learning[J]. Neural Computation, 1998(10):251-276.
- [5] 王文川, 韩焱. 基于变步长 LMS 自适应时延估计算法[J]. 信息与电子工程, 2009,7(1):32-36. (WANG Wenchuan, HAN Yan. Time-delay Estimation Based on Variable Step Size LMS Algorithm[J]. Information and Electronic Engineering, 2009,7(1):32-36.)
- [6] OU Shifeng, ZHAO Xiaohui, GAO Ying. Variable Step-Size Technique for Adaptive Blind Decorrelation [C]// Eighth ACIS International Conference on software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing. Qingdao: [s.n.], 2007:823-826.
- [7] ZHU Xiaolong, ZHANG Xianda, DING Zizhe, et al. Adaptive Nonlinear PCA Algorithms for Blind Source Separation Without Prewhitening[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2006,53(3):745-752.
- [8] YE Jimin, HUANG Ting. New Fast-ICA Algorithms for Blind Source Separation Without Prewhitening[J]. Communications in Computer and Information Science, 2011,255(2):579-585.
- [9] 柴晓冬, 尧辉明, 柴靛. 采用基于独立分量分析的盲信号分离方法分离出FSK信号中的干扰信号[J]. 中国铁道科学, 2009,30(4):96-101. (CHAI Xiaodong, YAO Huiming, CHAI Liang. Removal of Interference Signal from FSK Signal Using the Method of Blind Signal Separation Based on Independent Component Analysis[J]. China Railway Science, 2009,30(4):96-101.)
- [10] ZHU Xiaolong, ZHANG Xianda. Blind Source Separation Based on Optimally Selected Estimating Functions[J]. Journal of Xidian University, 2003,30(3):335-339.

作者简介:



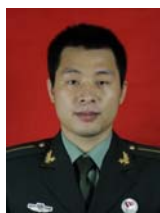
唐兴佳(1987-), 男, 甘肃省武威市人, 在读硕士研究生, 研究方向为信息与盲信号处理.
email:343425169@qq.com.

张秀方(1988-), 女, 山东省济宁市人, 在读硕士研究生, 研究方向为叶斯网络与应用.

(上接第 582 页)

- [8] Zhang Zhongshan, Liu Jian, Long Keping. Low-Complexity Cell Search with Fast PSS Identification in LTE[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011,61(4):1719-1729.
- [9] Xu W, Manolakis K. Robust synchronization for 3GPP LTE systems[C]// IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM). Miami, FL:IEEE, 2010.
- [10] Chu D. Polyphase codes with good periodic correlation properties(Corresp.)[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1972,18(4):531-532.
- [11] Lindoff B, Ryden T, Astely D. A robust cell search algorithm for 3GPP LTE[C]// European Wireless Conference 2009. Aalborg:[s.n.], 2009:303-307.
- [12] Popovic B M, Berggren F. Primary synchronization signal in E-UTRA[C]// 2008 IEEE International on Spread Spectrum Techniques and Applications(ISSSTA). Bologna, Italy:IEEE, 2008:426-430.
- [13] Feng Wang, Yu Zhu. An Efficient CFO Estimation Algorithm for the Downlink of 3GPP-LTE[C]// 2011 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing(WCSP). Nanjing:[s.n.], 2011:1-6.
- [14] 3GPP TS36.104 V8.5.0, Base Station(BS) radio transmission and reception[S].

作者简介:



漆 飞(1987-), 男, 四川省眉山市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线与移动通信技术.email:qifei1987_0103@163.com.

周 游(1986-), 男, 合肥市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为无线与移动通信技术.

胡捍英(1961-), 男, 河南省南阳市人, 博士, 教授, 国家 863 专家组成员, 主要研究方向为无线移动通信技术.

赵卫波(1988-), 男, 河北省藁城市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线移动通信技术.