改进 ICA 去噪方法在瞬变电磁信号处理中的应用

刘祥平　王建明†
(北京师范大学信息科学与技术学院, 100875, 北京)

摘要　提出一种改进 ICA 去噪方法, 可确定去噪后的信号幅值. 用于消除瞬变电磁信号中的工频干扰, 并与传统陷波滤波方法进行比较. 实验结果表明, 采用改进 ICA 去噪方法, 在消除工频干扰的同时, 能很好地保留信号的波形和特征, 去噪效果明显优于陷波滤波方法. 在较低信噪比下仍可有效地提取信号, 具有实用价值.

关键词　瞬变电磁法; 独立成分分析(ICA); 工频干扰

0　引言

瞬变电磁法(transient electromagnetic method, TEM)是一种建立在电磁感应原理基础上的时间域电磁探测方法. 利用发送线框向地下发送一次脉冲磁场, 在一次场的激励下, 地下导体内部感应出涡旋电流, 此涡流不会立即消失, 而会在其周围空间形成随时间衰减的二次磁场. 用接收线框观测二次磁场, 分析其衰减规律, 就可以反演出地下异常体的导电性、体积规模和埋深等有用信息. 瞬变电磁法具有对电阻率变化灵敏度高、探测深度大、设备轻便廉价等优点. 几十年来, 瞬变电磁法从原理方法到仪器技术都获得了长足发展, 并广泛应用于油气勘探、金属矿勘探、工程勘查、考古探测和寻找地下水等诸多领域[1-3].

瞬变电磁法采用单匝大线圈或多匝小线圈接收信号, 信号中不可避免地会叠加各种电磁干扰, 如工频干扰、矿山或工业用电的干扰、广播和无线电台的干扰、天然电磁场干扰等. 其中尤以工频干扰最为常见, 影响也最大, 消除工频干扰成为瞬变电磁信号处理的重要课题. 传统的消除工频干扰的方法是采用 50Hz 陷波滤波器对含噪信号进行滤波处理, 这种方法在消除工频干扰的同时, 也消掉了有用信号中 50Hz 附近的频率成分, 并且滤波后会产生相位偏移, 使得滤波后信号产生失真. 本文将独立成分分析(ICA)用于消除瞬变电磁信号中的工频干扰, 这种方法在消除工频干扰的同时, 能很好地保留有用信号的波形和特征. 然而基本的 ICA 模型具有幅值含混性, 故本文提出一种改进 ICA 去噪方法, 以确定去噪后的信号幅值.

1　独立成分分析

独立成分分析(independent component analysis, ICA)是近年发展起来的数据及信号分析方法. 独立成分分析是一种基于统计的方法, 对于一组相关的混合观测信号, 寻求一个数据的非奇异变换, 使得变换后的数据分量之间相互独立. ICA 模型最早是为了解决线性混合的盲信号分离(BSS)问题而提出的, 经过不断的发展, 已广泛应用于通信信号处理、医学信号处理、语音信号处理、阵列信号处理等领域[4-6].

1.1　ICA 模型　假设观测到 n 个随机变量 $x_1, \cdots, x_n$, 这些变量是由另外 n 个相互独立的随机变量 $s_1, \cdots, s_n$ 线性组合而成:

$$x_i = a_{i1}s_1 + a_{i2}s_2 + \cdots + a_{in}s_n, i = 1, \cdots, n. \quad (1)$$

这就是基本的 ICA 模型. 此模型也可表示为向量和矩阵形式:

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{AS}, \quad (2)$$

其中 $\boldsymbol{X} = (x_1, \cdots, x_n)^{\mathrm{T}}$ 是观测的 n 维随机向量, $\boldsymbol{S} = (s_1, \cdots, s_n)^{\mathrm{T}}$ 是 n 维独立的源信号向量, $\boldsymbol{A}$ 为 $n \times n$ 的混合矩阵[4-5]. 独立成分分析的目的就是在源信号 $\boldsymbol{S}$ 和混合矩阵 $\boldsymbol{A}$ 均未知, 而只知道观测信号 $\boldsymbol{X}$ 并假定源信号 $\boldsymbol{S}$ 的各分量相互独立的情况下, 求解分离矩阵 $\boldsymbol{W}$ 和源信号的最优估计 $\boldsymbol{Y}$, 这里

$$\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{WX} \quad (3)$$

其中 $\boldsymbol{W}$ 为混合矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的逆矩阵, 式(2)为 ICA 的生成模型, 式(3)为 ICA 的求解模型.

1.2　ICA 的求解方法　ICA 模型的求解有多种方法, 但统一起来都是采用某个目标函数加上某种优化算法来实现. 目标函数有峭度、负熵、互信息等, 优化算法有梯度下降算法和快速不动点算法等. 根据中心极限定理, 在一定的条件下, 独立的随机变量之和的分布趋向于高斯分布. 那么通常多个独立随机变量之和比原始的随机变量更接近于高斯分布, 所以极大化非高斯性即可分离出独立源信号[4-5]. 非高斯性的度量有峭度和

† 通信作者
收稿日期: 2009-09-03

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

负熵两种,高斯随机变量的峭度和负熵为零,非高斯性越大则峭度绝对值越大,负熵越大.由于峭度对野值敏感,所以通常都采用鲁棒性更好的负熵作为非高斯性的度量. Aapo Hyvarinen 等提出了一种基于负熵的快速不动点算法,简称 FastICA 算法. FastICA 算法具有鲁棒性好,收敛速度快等优点[7-8].

寻找一个极大化非高斯方向的 FastICA 算法如下:

①对观测数据 $\boldsymbol{X}$ 进行中心化和白化,预处理后记为 $\boldsymbol{Z}$;

②随机选取一个具有单位范数的初始化向量 $\boldsymbol{w}$;

③迭代, $\boldsymbol{w}\leftarrow E\{Zg(w^{\mathrm{T}}Z)\}-E\{g'(w^{\mathrm{T}}Z)\}w$, 函数 g 的定义如式(4)或式(5),本文取式(4)进行计算;

④归一化, $\boldsymbol{w}\leftarrow w/\|w\|$, 其中 $\|w\|$ 为 w 的2-范数;

⑤返回第③步进行迭代,直到收敛为止.

$$g(y)=\tanh(y) \tag{4}$$

$$g(y)=y\exp(-y^2/2) \tag{5}$$

当相邻两次迭代后 w 之差的2-范数小于某个给定阈值时(本文取0.000 000 000 1),即认为已经收敛.求出的向量 w 为分离矩阵 W 的其中一列,如果有多个独立成分,可以逐个串行求解,也可以同时并行求解.求出一个独立成分后,要从数据中减去该成分,从而避免多次收敛到同一方向.

1.3 ICA的幅值含混性 在ICA模型中,源信号的幅值或方差是无法确定的,甚至符号也可能刚好相反.这是因为源信号 $\boldsymbol{S}$ 和混合矩阵 $\boldsymbol{A}$ 都是未知的,将某一个源信号 s_i 乘以任意非零实数 r_i,而将 $\boldsymbol{A}$ 矩阵对应的列 a_i 除以 r_i,观测信号将保持不变,见式(6).反之,对于一定的观测信号,可以有无数种源信号和混合矩阵的组合,所以是无法确定源信号的幅值和方差的.

$$x_i=\sum_i\left(\frac{1}{r_i}a_i\right)(r_is_i) \tag{6}$$

2 基于ICA的工频干扰消除方法

2.1 引入参考噪声消除工频干扰 独立成分分析可以用于信号去噪,是因为信号和噪声往往是统计独立的,能够被很好地分离,通过去除噪声分量,保留信号分量,即可达到信号去噪的目的.然而基本ICA模型要求观测信号的数目与源信号的数目相同,实际应用中在只有一路含噪信号的情况下,不能直接应用ICA方法进行去噪.文献[9-12]等提出了引入虚拟参考噪声通道进行ICA去噪的方法,其去噪原理如图1所示.

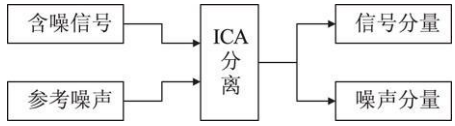


图1 引入参考噪声的ICA去噪原理

瞬变电磁信号中含有严重的工频干扰,其数学模型可表示为:

$$x(t)=a_{11}\times s(t)+a_{12}\times n(t)=a_{11}\times s(t)+a_{12}\times A_0\times\sin(2\pi f_0t+\theta_0), \tag{7}$$

其中 $s(t)$ 为有效信号, $n(t)$ 为工频干扰, A_0、f_0、θ_0 分别为工频干扰的幅度、频率和相位, a_{11} 与 a_{12} 是混合矩阵的常系数.为了采用ICA方法去除工频干扰,需要构造参考噪声通道.工频干扰的频率 f_0 是已知的(一般为50 Hz),幅值 A_0 在ICA模型中毫无影响,相位 θ_0 是随机变量.如果根据不同相位 θ_0 构造不同的参考噪声,则需要构造多个参考通道,这样不仅计算复杂度高,去噪效果也不好.文献[11]提出了构造2个相互正交的工频参考源 $r_1(t)=\sin(2\pi f_0t)$, $r_2(t)=\cos(2\pi f_0t)$ 的方法,文献[12]对此方法进行了理论推导.由于任何相位的工频干扰都可以通过 $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 线性相加得到,符合ICA基本模型的要求,该方法很好地解决了工频干扰相位不确定的问题.

2.2 改进ICA去噪方法 ICA模型具有幅值含混性,如果直接将ICA的结果 $\boldsymbol{Y}$ 中某个分量作为去噪后的信号,则信号的幅值是不确定的,甚至与原信号符号相反,以至于部分学者认为ICA只能用于定性分析,不能用于定量处理.

如果分别考虑源信号 $\boldsymbol{S}$ 和混合矩阵 $\boldsymbol{A}$, ICA方法确实不能估计出其幅值.然而对于一些特定情况,最初的源信号的幅值究竟是多少并不重要,只要知道混合后观测信号中各信号成分的幅值即可,信号去噪应用便是如此.混合后观测信号中各信号成分的幅值是确定并可以求解的,含噪信号可以看作是信号和噪声混合后的观测信号,采用ICA方法可分离信号和噪声分量并确定信号和噪声幅值,从而达到去噪目的.所以ICA方法可以用于定量分析和处理.

根据式(1)或式(2),有

$$\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\\vdots\\x_n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_{11}&a_{12}&\cdots&a_{1n}\\a_{21}&a_{22}&\cdots&a_{2n}\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\a_{n1}&a_{n2}&\cdots&a_{nn}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}s_1\\s_2\\\vdots\\s_n\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}a_{11}s_1+a_{12}s_2+\cdots+a_{1n}s_n\\a_{21}s_1+a_{22}s_2+\cdots+a_{2n}s_n\\\vdots\\a_{n1}s_1+a_{n2}s_2+\cdots+a_{nn}s_n\end{bmatrix}, \tag{8}$$

式中, $a_{11}s_1$ 为观测信号 x_1 中所含的 s_1 信号成分, $a_{12}s_2$ 为观测信号 x_1 中所含的 s_2 信号成分,以此类推, $a_{1n}s_n$

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为观测信号 x_1 中所含的 s_n 信号成分. 同理其他观测信号中的信号成分也可如此分解. 尽管由 ICA 模型的幅值含混性可知 a_{ij} 和 s_j 的幅值都是不确定的, 然而 $a_{ij}s_j$ 却是确定不变的. 因为如果 s_j 被乘以任意非零实数 r_j, 则 a_{ij} 必除以相应的非零实数 r_j, 它们的乘积确定不变. 所以说混合后观测信号中各信号成分的幅值是确定并可以求解的. 在信号去噪应用中, 不妨将含噪信号作为观测信号 x_1, 其余观测信号为参考噪声. 含噪信号可分解为 $a_{11}s_1$、$a_{12}s_2$ …$a_{1n}s_n$ 等信号或噪声成分, 然后保留其中的信号成分, 去除噪声成分即可.

本文提出一种改进 ICA 去噪方法, 不直接将 ICA 的结果 $\boldsymbol{Y}$(源信号 $\boldsymbol{S}$ 的估计) 中的某个分量作为去噪后的信号, 而是先用 FastICA 算法求出分离矩阵 $\boldsymbol{W}$ 和源信号的估计 $\boldsymbol{Y}$, 再将分离矩阵 $\boldsymbol{W}$ 求逆得到混合矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的估计 $\boldsymbol{B}$, 将 $\boldsymbol{B}$ 中相应的系数与 $\boldsymbol{Y}$ 中的信号分量相乘作为去噪后的信号, 从而达到确定信号幅值的目的. 为了去除信号中的工频干扰, 将含噪信号作为观测信号 x_1, 引入两路相互正交的工频参考源作为观测信号 x_2 和 x_3, 构成观测信号向量 $X=(x_1, x_2, x_3)^{\mathrm{T}}$. 采用 FastICA 算法求出分离矩阵 $\boldsymbol{W}$ 和源信号的估计 $Y=(y_1, y_2, y_3)^{\mathrm{T}}$, 对 $\boldsymbol{W}$ 求逆矩阵得到混合矩阵的估计

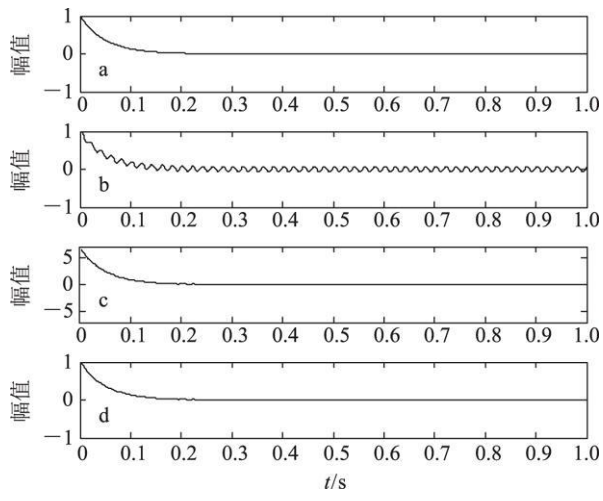
$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}.$$

含噪信号可分解为 $x_1=b_{11}y_1+b_{12}y_2+b_{13}y_3$, 其中 $b_{11}y_1$、$b_{12}y_2$、$b_{13}y_3$ 为 *1* 个信号分量和 *2* 个噪声分量, 根据与工频干扰的相似度可识别出哪 *2* 个分量为噪声分量, 去掉这 *2* 个分量, 剩余的信号分量即作为去噪后的结果.

3　实验结果及分析

3.1　实验结果　为了验证改进 ICA 去噪方法确定信号幅值的效果, 进行了如下模拟实验. 局部导电体的瞬变电磁响应晚期按指数规律衰减, 以 $x(t)=\mathrm{e}^{\frac{-t}{0.05}}$ 模拟瞬变电磁信号, 采样率为 1 kHz, 采样点数为 1 000 点. 加入信噪比为 10 dB 的工频干扰, 频率 f_0 取 50 Hz, 相位随机. 构造 2 个相互正交的工频参考源 $r_1(t)=\sin(100\pi t)$, $r_2(t)=\cos(100\pi t)$, 采用改进 ICA 去噪方法消除工频干扰. 由图 2 可知, ICA 的结果与原信号的幅值差异很大, 而经过改进 ICA 去噪方法处理后幅值与原信号几乎相同.

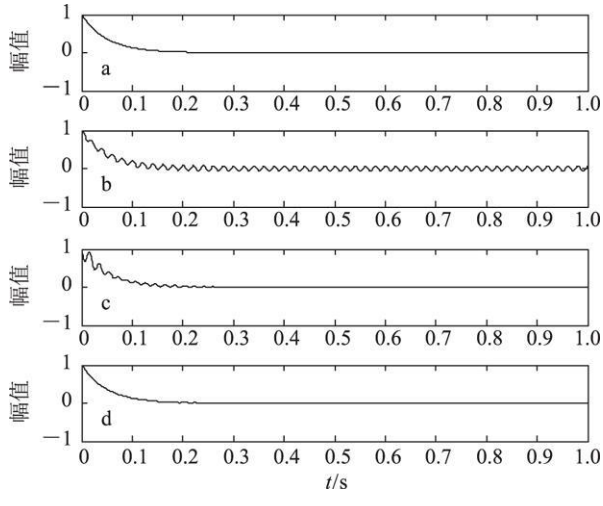
为了比较改进 ICA 去噪方法和传统陷波滤波方法消除工频干扰的效果, 在相同条件下采用 4 阶巴特沃斯陷波滤波器进行滤波处理, 中心频率为 50 Hz. 图 3 所示为陷波滤波方法和改进 ICA 去噪方法去噪后的



a. 原始信号波形; b. 信噪比为 10 dB 的含噪信号波形;
c. ICA 结果中的信号分量;
d. 改进 ICA 去噪方法确定幅值后的去噪信号.

图 2　改进 ICA 去噪方法确定信号幅值的效果

波形, 可见陷波滤波使得信号波形失真, 而改进 ICA 去噪方法很好地保留了信号的波形和特征. 图 4 所示为陷波滤波和改进 ICA 去噪方法去噪后的频谱, 可见陷波滤波去除工频干扰的同时破坏了工频附近原始信号的频谱, 而改进 ICA 去噪方法对原始信号的频谱几乎没有影响, 但消除了大部分工频干扰, 仅有少许残余.



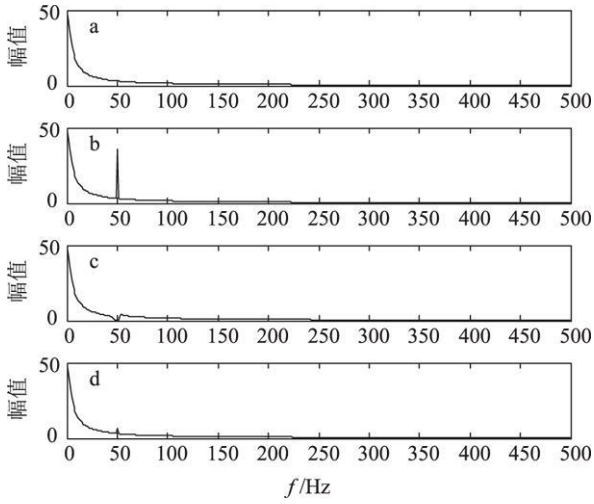
a. 原始信号波形; b. 信噪比为 10 dB 的含噪信号波形;
c. 陷波滤波后的波形; d. 改进 ICA 去噪方法去噪后的波形.

图 3　陷波滤波和改进 ICA 去噪方法去噪后波形对比

在不同输入信噪比情况下, 采用陷波滤波和改进 ICA 去噪方法进行去噪实验, 每种情况做 10 次实验, 并计算平均输出信噪比. 实验结果如表 1 所示:

为了便于直观比较, 将表 1 数据绘成曲线, 如图 5 所示. 可见改进 ICA 去噪方法明显优于传统的陷波滤波方法, 信噪比得到了较大提高.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



a. 原始信号频谱; b. 信噪比为 10 dB 的含噪信号频谱;
c. 陷波滤波后的频谱; d. 改进 ICA 去噪方法去噪后的频谱.

图 4 陷波滤波和改进 ICA 去噪方法去噪后频 谱对比

表 1 不同输入信噪比实验结果

输入信噪比(dB)	平均输出信噪比(dB)	
	陷波滤波	改进 ICA 去噪
20	15. 14	30. 20
15	15. 20	30. 01
10	15. 23	29. 40
5	15. 63	28. 70
0	13. 94	27. 19
- 5	10. 79	23. 11
- 10	6. 24	18. 92
- 15	1. 87	16. 15
- 20	- 3. 37	9. 17

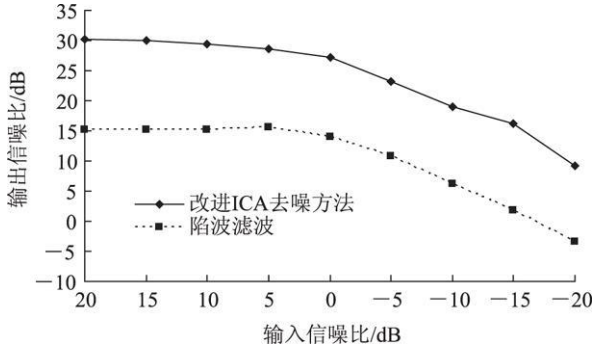
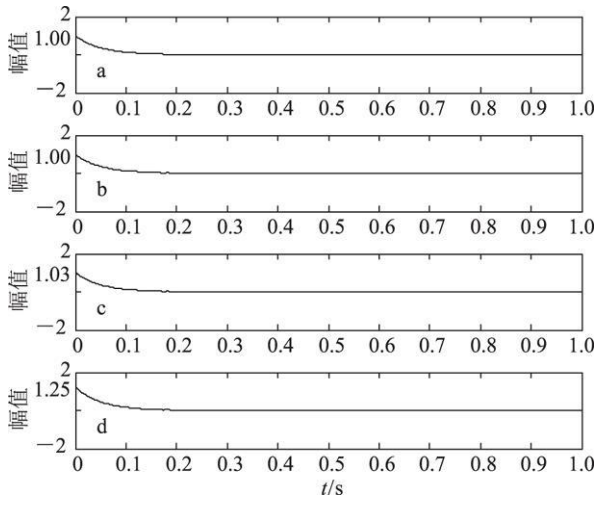


图 5 不同输入信噪比下去噪效果对比

不同输入信噪比情况下, 采用改进 ICA 去噪方法消除工频干扰的效果如图 6所示. 由图可见, 不同输入信噪比下的去噪后波形几乎相同, 而存在一定的幅度误差, 幅度误差是造成输出信噪比随输入信噪比减小而减小的主要原因.

3.2 结果分析 改进 ICA 去噪方法消除工频干扰的效果明显优于传统的陷波滤波方法, 其根本原因是陷波滤波方法在消除工频干扰的同时也破坏了工频附近的信号频谱, 导致波形失真, 而独立成分分析是一种基



a. 原始信号波形;
b. 信噪比为 20 dB 时改进 ICA 去噪后的波形;
c. 信噪比为 0 dB 时改进 ICA 去噪后的波形;
d. 信噪比为- 20 dB 时改进 ICA 去噪后的波形.

图 6 不同输入信噪比下改进 ICA 去噪波形 对比

于统计的方法, 不会影响信号频谱.

改进 ICA 去噪方法尽管大大提高了信噪比, 但并没有完全消除工频干扰, 总是存在一定的残余干扰, 其根本原因是: 虽然瞬变电磁信号和工频干扰理论上是相互独立的, 但由于数据量有限或其他原因使得数据之间存在一定的相关性, 而 ICA 的结果是使各分量尽可能的独立, 从而造成了一定的误差. 如果增大数据量, 去噪效果会更好.

改进 ICA 去噪后的波形对输入信噪比不敏感, 在很低信噪比时仍能很好地得到信号波形. 但随着输入信噪比下降, 幅度误差增大. 此误差不是 ICA 本身和改进 ICA 去噪方法原理上的缺陷, 此误差的根本来源还是信号与噪声数据之间存在一定的相关性, 在低信噪比下微弱信号成分的误差被放大. 在信号和噪声数据完全独立的情况下, 改进 ICA 去噪方法可以在很低信噪比下很好地去除噪声.

4 总结与展望

本文提出一种改进 ICA 去噪方法, 用于消除瞬变电磁信号中的工频干扰, 取得了满意的效果, 并与传统陷波滤波方法进行了比较, 实验结果表明改进 ICA 去噪方法优于陷波滤波方法. 本文还分析了改进 ICA 去噪方法误差产生的原因, 指出信号与噪声数据存在一定的相关性是导致误差的根本原因. 由于改进 ICA 去噪后的波形对输入信噪比不敏感, 使之有望用于微弱信号处理. 如何进一步减小幅度误差、克服局限性, 需要更深入的研究.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5　参考文献

[1] 牛之琏. 时间域电磁法原理[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2007

[2] 薛国强, 李貅, 底青云. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1195

[3] 刘桂芹. 简述瞬变电磁法(TEM)的研究现状、进展与问题[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(增刊): 108

[4] Hyvarinen A, Karhunen J, Oja E. Independent component analysis[M]. [S.l.]. Wiley, 2001

[5] Hyvarinen A, Oja E. Independent component analysis: algorithm and application[J]. Neural Networks, 2000, 13 (4): 411

[6] 杨金成, 张南. 独立成分分析技术综述[J]. 舰船科学技术, 2007, 29(2): 83

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

[8] Hyvarinen A, Oja E. A fast fixed-point algorithm for independent component analysis [J]. Neural Computation, 1997, 9 (7): 1483

[9] 杨燕, 袁海庆, 赵丽芝. 独立分量分析在结构振动信号降噪中的应用[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2008, 25(3): 234

[10] 李洪, 孙云莲, 徐长宝. 基于独立分量分析算法的局部放电信号去噪方法研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2007, 39(6): 143

[11] 吴小培, 詹长安, 周荷琴, 等. 采用独立分量分析方法消除信号中的工频干扰[J]. 中国科技大学学报, 2000, 30 (6): 671

[12] 魏巍, 刘学伟. 基于独立分量分析的工频干扰消除技术[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(1): 227

IMPROVED ICA DENOISING METHOD AND APPLICATION IN TRANSIENT ELECTROMAGNETIC SIGNAL PROCESSING

LIU Xiangping　WANG Jianming

(College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China)

Abstract　An improved ICA denoising method is presented, to ascertain amplitude of denoised signal. This method was used to remove power interference in transient electromagnetic signal, and was compared with traditional notch filter. Data showed that wave and feature of desired signal were preserved while power interference was removed by this improved ICA denoising, markedly better than notch filter. This method was effective under lower SNR, and was practical.

Key words　transient electromagnetic method; independent component analysis(ICA); power interference

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net