

一种改进的自适应干扰对消技术研究及 在电磁辐射测量中的应用

张兰勇, 刘 胜, 李 冰

(哈尔滨工程大学自动化学院, 黑龙江哈尔滨 150001)

摘 要: 提出了一种适合于处理非平稳随机信号的改进自适应干扰对消算法. 首先利用经验模态分解的分频特性将多频复杂信号分解到不同的固有模态函数中, 再利用改进的最小均方自适应算法进行干扰对消. 计算机仿真以及试验结果证明, 该方法有效地滤除了含噪电磁信号中的电磁噪声干扰, 提高了电磁辐射测量的速度和精度, 具有重要的工程应用价值.

关键词: 电磁辐射测量; 经验模态分解; 自适应干扰对消; 最小均方算法; 滤波

中图分类号: TM931 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 06-1394-05

The Study of an Improved Adaptive Interference Cancellation Technology and Its Application in the Electromagnetic Radiation Measurement

ZHANG Lan-yong, LIU Sheng, LI Bing

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract: The paper presents an improved adaptive interference cancellation algorithm filtering nonstationary random signal. The complex electromagnetic radiation signal is decomposed to some signals with different frequency by the Empirical Mode Decomposition(EMD) method. An improved least mean square(LMS) algorithm is applied to the adaptive interference cancellation. Computer simulation and experimental results show that the method has better noise cancellation capability than the traditional adaptive noise cancellation. At the same time, the adaptive interference cancellation improves the speed and precision of electromagnetic radiation measurement. So it can be introduced to the engineering application.

Key words: electromagnetic radiation measurement; empirical mode decomposition; adaptive interference cancellation; least mean square; filtering

1 引言

随着现代社会中电子设备的应用越来越广泛, 各种电磁辐射已经严重影响了人们的工作和生活^[1]. 所以针对电子设备产生的电磁辐射进行准确测量是目前急需进行的一项工作. 由于受到广播电台, 移动通讯, 电离层辐射等各种电磁干扰的影响, 对设备进行电磁辐射测量通常包含了严重的背景噪声. Shinozuka 教授提出了在市区内进行电磁干扰测量并消除环境干扰的方法^[2]. 此方法利用传统 EMI 测量接收机建立双通道在频域内测量. 但是由于测量接收机在整个频率范围内进行步进扫描, 所以如果频率范围需要很宽并且需要精确度很高的时候会花费大量时间. 此外, 此方法的应用在 Parhami 一篇文章中也有详细的阐述^[3]. 为了加快测量速度, Braun 教授提出了用于实时电磁干扰 (TDEMI) 测量的新方

法^[4]. 此方法在时域里测量辐射发射并计算其频谱. 该方法结合了 TDEMI 测量节省时间的优点, 提出了在时域测量受试设备辐射信号并去除环境干扰的算法. 但此方法不能处理非线性非平稳信号.

本文介绍的自适应干扰对消技术将电磁辐射测量问题转化为信号处理问题, 电磁辐射测量中的背景噪声就是通常信号处理中的噪声, 电磁辐射信号即为需要准确测量的有用信号. 近三十年来, 自适应干扰对消技术在各种领域得到越来越广泛的应用. 徐玮等提出了采用干扰对消技术改善噪声环境中的语音通信效果^[5], 但由于利用传统最小均方算法进行滤波, 收敛性较差. 沈宏等改进了噪声对消算法并应用于窄带干扰抑制中^[6], 较好的抑制了局部放电在线监测中的窄带干扰, 但是没有对自适应滤波过程中的阈值如何设定作出理论说明. 本文利用经验模态分解的分频特性将多频复杂信号分解

到不同的固有模式函数中,把多频率的复合信号转化为多个单频率的信号,基于有用信号与噪声在不同的固有模式函数上有不同的特征,利用改进的最小均方自适应算法进行干扰对消,以达到较好的滤波性能。

2 经验模态分解

希尔伯特变换直接应用与信号处理可能会得到负频率^[7],只有正的瞬时频率才有物理意义。所以,需要对信号做相应的限制:

- (1)其极大值点与极小值点的包络关于 t 轴对称;
- (2)其极大值点与极小值点的个数与过零点的个数相等或至多差 1。

只有满足以上两个条件的信号用希尔伯特变换法才能得到有意义的瞬时频率。而希尔伯特-黄变换方法中提出的固有模式函数就是满足以上条件的函数^[8]。

满足上述限制条件的固有模式函数可以采用希尔伯特变换法得到有意义的瞬时频率。但实际应用中许多信号并不是固有模式函数,因此必须设法将信号分解成各个固有模式函数分量,才能利用希尔伯特变换法求得瞬时频率。为此,Norden E. Huang 等人提出了经验模式分解法^[8]。

设实信号为 $x(t)$,根据固有模式函数的定义, m^k 表示对信号 $x(t)$ 求 k 次均值,信号 $x(t)$ 与 $m^1[x(t)]$ 的差值定义为固有模式函数分量 c_1 ,即

$$c_1 = x(t) - m^1[x(t)] \quad (1)$$

得到 c_1 后,用 $x(t) - c_1$ 作为待处理信号再进行分解,可得到第 2 个固有模式函数分量 c_2 ,以此类推,各次固有模式函数分量的表达式为

$$\begin{cases} c_2 = x(t) - c_1 - m^1[x(t) - c_1] = m^1[x(t)] - m^2[x(t)] \\ c_3 = x(t) - c_1 - c_2 - m^1[x(t) - c_1 - c_2] \\ \quad = m^2[x(t)] - m^3[x(t)] \\ \dots \\ c_n = m^{n-1}x(t) - m^n x(t) \end{cases} \quad (2)$$

分解过程满足设定的条件后即可停止。

因此,原信号 $x(t)$ 的解析函数

$$z(t) = \sum_{k=1}^n a_k(t) e^{j\int \omega_k(t) dt} \quad (3)$$

由于各固有模式函数分量的一系列瞬时频率 ω_k ($k = 1, 2, \dots, n$) 可以得到,经验模式分解充分反映出原信号的瞬时频率特征^[10]。

首先,从连续交替的局部极大值点与极小值点用三次样条插值拟合成上包络与下包络线。对上包络与下包络求均值,得 m_1 。则分量 h_1 为信号 $x(t)$ 与均值 m_1 的差值,即

$$x(t) - m_1 = h_1 \quad (4)$$

直到第 k 次处理,即 h_k 满足成为一个固有模式函数的条件,此时

$$c_1 = h_{1k} \quad (5)$$

通常设定停止处理的准则为标准差 E_{sd} 为 0.2。

$$E_{sd} = \sum_{t=0}^T \left[\frac{|h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right] \quad (6)$$

3 改进的自适应干扰对消技术

3.1 自适应干扰对消技术

本文设计的自适应干扰对消系统是将有用信号 S_j 和背景噪声信号 I_j 的混合信号作为系统的一个输入,即 n_{0j} 。第二个输入的是背景噪声信号 I_j ,即 n_{1j} 。首先将非平稳信号进行经验模态分解,再利用自适应算法进行逐层滤波处理,将来自测量系统的输出作为原始信号减去参考信号,图中 n_{0j} 和 n_{1j} 由于是共源干扰,所以相互关联,但与待测设备的辐射信号 S_j 无关。系统原理图如图 1 所示。

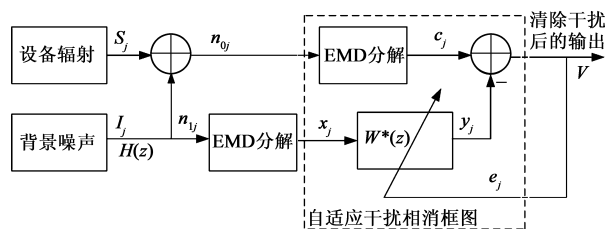


图1 改进的自适应干扰对消原理框图

图 1 中,利用两个天线分别测量设备辐射信号和背景噪声。 S_j 为需要测量的有用信号,背景噪声为参考输入。通常测量工具测得的设备电磁辐射都会包含环境中的背景噪声,利用经验模态分解算法(EMD)将多频复合信号分解为单频信号,再利用自适应干扰对消系统进行滤波处理。系统的输出计算式推导如下式:

$$y = W \times (I_j + n_{ij}) \quad (7)$$

$$d = S_j + I_j + n_{0j} \quad (8)$$

$$V = d - y = S_j + I_j + n_{0j} - [W \times (I_j + n_{1i})] \approx S_j \quad (9)$$

利用最小均方算法选取正确的比例因子 W ,则输出会十分接近有用信号 S_j 。

3.2 改进的最小均方算法

基于最速下降法的最小均方误差(LMS)算法^[12]的迭代公式如下:

$$e(n) = d(n) - X^T W(n) \quad (10)$$

$$W(n+1) = W(n) + 2\mu_e(n) X(n) \quad (11)$$

其中, $X(n) = [x(n), x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-L+1)]^T$ 表示时刻 n 的输入信号矢量,由最接近的 L 个信号采样值构成。 $W(n) = [\omega_0(n), \omega_1(n), \dots, \omega_{L-1}(n)]^T$ 是时刻 n 自适应滤波器的权系数。 L 是自适应滤波器的阶数。 $d(n)$ 是期望输出值, $e(n)$ 是误差, μ 是控

制稳定性和收敛速度的参量,称之为步长因子.

为了更好地应用于自适应干扰对消系统,提出一种新的变步长算法.在该算法中,自适应的变化步长是通过对方误差的估计来调节的,其权系数的递推公式为:

$$\mathbf{W}(n+1) = \mathbf{W}(n) + \boldsymbol{\mu}(n)\mathbf{e}(n)\mathbf{X}(n) \tag{12}$$

式中, $\boldsymbol{\mu}(n)$ 为步长系数. 它的更新表达式为:

$$\boldsymbol{\mu}(n+1) = \alpha\boldsymbol{\mu}(n) + \gamma\mathbf{p}^2(n) \tag{13}$$

$$\mathbf{p}(n) = \beta\mathbf{p}(n-1) + (1-\beta)\mathbf{e}^2(n) \tag{14}$$

并且

$$\boldsymbol{\mu}(n+1) = \begin{cases} \boldsymbol{\mu}_{\max}, & \boldsymbol{\mu}(n+1) > \boldsymbol{\mu}_{\max} \\ \boldsymbol{\mu}_{\min}, & \boldsymbol{\mu}(n+1) < \boldsymbol{\mu}_{\min} \\ \boldsymbol{\mu}(n+1), & \text{else} \end{cases} \tag{15}$$

式中, $0 < \alpha < 1, \gamma > 0, 0 < \beta < 1$. 参数 γ 用来控制算法的失调和收敛时间, 参数 β 是一指数型权系数参数, 也用来控制收敛时间. 一般情况下, $\boldsymbol{\mu}_{\max}$ 的选择接近标准 LMS 算法不稳定的步长点, 以提供最大的可能收敛速度. 而在稳定状态下, 根据所预期的失调和算法的收敛速度做出一个合适的选择. $\boldsymbol{\mu}_{\max}$ 的范围为:

$$0 < \boldsymbol{\mu}_{\max} < \frac{2}{3\text{tr}(\mathbf{R})} \tag{16}$$

其中 \mathbf{R} 为输入信号的自相关矩阵, 即 $\mathbf{R} = \text{E}\{\mathbf{X}(n)\mathbf{X}^T(n)\}$. 由式(13)、(14)可知, 这种算法比固定步长的 LMS 算法更具有优越性: 在自适应初始阶段, 自适应系统输出误差较大, 相应的均方误差估计 $\mathbf{p}(n)$ 也较大, 导致步长 $\boldsymbol{\mu}(n)$ 较大, 这使得收敛速度加快; 当权系数接近最佳值时, 自适应系统输出误差很小, 相应的均方误差估计 $\mathbf{p}(n)$ 变小, 导致步长 $\boldsymbol{\mu}(n)$ 减小, 因此在最佳权系数附近产生较小的失调. 这里式(16)的主要作用是防止步长因子由于独立噪声影响或其它原因而产生过大或过小的剧烈变化, 从而避免算法性能变差甚至发散.

改进最小均方误差算法的收敛速度与传统算法对比如图 2 所示.

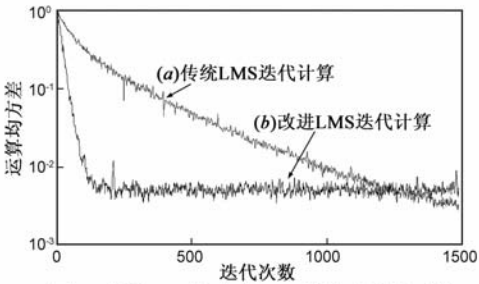


图2 改进LMS与传统LMS的迭代曲线对比

图 2 中, 曲线 (b) 表示改进 LMS 算法的迭代曲线, 曲线 (a) 表示传统 LMS 的迭代曲线. 可以看出, 改进的 LMS 算法大大提高了收敛速度和精度.

4 仿真及试验数据分析

4.1 仿真分析

为了证明改进的自适应干扰对消系统处理信号的能力, 下面利用普通自适应滤波器和改进的自适应干扰对消系统分别对一非平稳信号的处理, 如图 3 所示. 图 3(a) 和图 3(b) 对比可以看出用普通自适应滤波去噪前后的信噪比提高较少, 并且去噪后波形局部发生畸变, 光滑性较差, 未能有效地剔除信号中的噪声; 从图 3(c) 可以看出基于经验模态分解的改进自适应干扰对消算法有效去除了背景噪声, 使信号更加平滑, 对信号的瞬态变化波动点的位置定位得很准确. 因此可以得出, 基于经验模态分解的改进自适应干扰对消算法去除了噪声干扰, 具有较强的适应性和很好去噪效果.

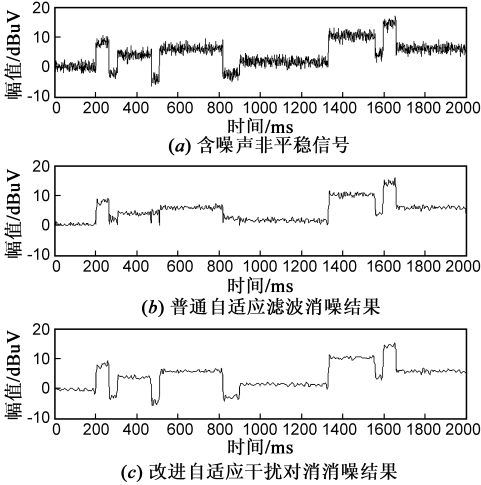


图3 改进自适应干扰对消方法与普通自适应滤波的消噪对比

4.2 试验数据分析

为进一步验证本文算法的有效性, 本节对某设备测得的辐射电磁信号进行了分析, 处理结果如图 4 所示. 从图 4(a) 可以看出, 由于存在严重的背景噪声, 有

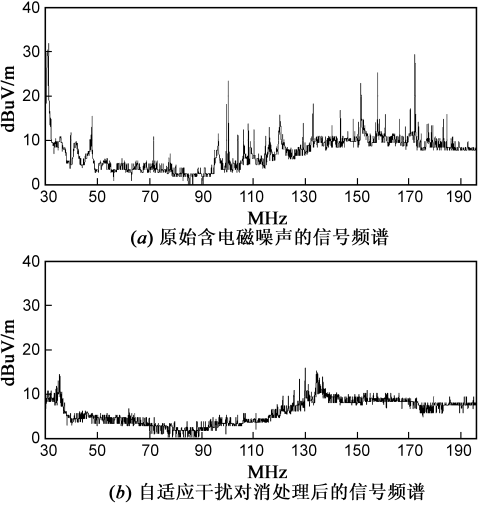


图4 自适应干扰对消处理电磁信号对比图

用信号完全被淹没在干扰噪声中,无法得知设备真实辐射幅值.图 4(b)给出了利用本文设计的算法进行实测电磁信号处理的结果.利用经验模态分解的方法对信号进行分解并利用改进自适应干扰对消滤波器进行滤波,成功滤除信号在 30MHz ~ 200MHz 之间的线性噪声谱,大约降低 10dB ~ 20dB,而保存了设备真实的辐射信号频谱.由于该电磁信号为非平稳信号,所以传统的自适应滤波算法不能很好的对信号进行分析和处理.而基于经验模态分解的改进自适应干扰对消系统极大保存了信号的局部特征.

5 结论

经验模态分解法是近年来出现的一种新的非平稳信号分析方法,可以根据信号的物理构成自适应地对信号进行分频分解.本文将它和自适应干扰对消技术结合起来,用以解决非平稳电磁信号的滤波问题,并利用改进的最小均方算法提高了收敛速度.计算机仿真及对实际电磁信号的处理表明,基于经验模态分解的改进自适应干扰对消技术将对多频率复杂信号的处理转化为对多个单频率信号的处理,有效地解决了在复杂电磁环境中进行设备的电磁辐射测量问题.与普通的自适应滤波相比,该方法提高了算法的收敛速率和精度,为进一步的工程应用奠定了良好的基础.

参考文献

- [1] Liu Sheng, Zhang Lanyong, Li Bing. Automatic testing system for power supply line conducted emission based on LabVIEW [A]. The International Workshop on Modern Science and Technology 2008 [C]. Harbin: IWMST, 2008. 589 – 593.
- [2] T shinuzuka, A Sugiura. Reduction of ambient noise in EMI measurement [A]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility Digest [C]. Nagoya, Japan: IEEE EMC Society, 1989. 24 – 28.
- [3] P Parhami, M Marino, S Watkins, E Nakauchi. Innovative pre-compliance test methodology using ambient cancellation and coherence detection techniques [A]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility [C]. Seattle, USA: IEEE EMC Society, 1999. 1022 – 1025.
- [4] S Braun, M Al-Qedra, P Russer. A novel realtime time-domain measurement system based on field programmable gate arrays [A]. 17th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility [C]. Singapore: IEEE EMC Society, 2006. 501 – 504.
- [5] 徐玮,孙象.语音通信中的自适应噪声对消系统设计[J].现代电子技术,2007,20(11):39 – 41.
XU Wei, SUN Xiang. An Adaptive Noise canceling system design for voice communications [J]. Modern Electronic Technology, 2007, 20(11): 39 – 41.
- ogy, 2007, 20(11): 39 – 41. (in Chinese)
- [6] 沈宏,张蒲,徐其惠,曹贝贞.改进自适应噪声对消算法的窄带干扰抑制[J].仪器仪表学报,2008,29(12):2632 – 2636.
Shen Hong, Zhang Pu, Xu Qihui, Cao Beizhen. Narrow-band interference suppression based on improved adaptive noise cancellation algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(12): 2632 – 2636. (in Chinese)
- [7] 钟佑明,秦树人.希尔伯特黄变换的统一理论依据研究[J].振动与冲击,2006,25(3):40 – 43.
Zhong Youming, Qin Shuren. Research on the uniform theoretical basis for Hilbert-Huang transform (HHT) [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(3): 40 – 43. (in Chinese)
- [8] N E Huang. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Journal Proc R Soc Lond A, 1998, 454(1971): 903 – 995.
- [9] 孔国杰,张培林,徐龙堂,吴烽.基于经验模态分解的自适应滤波算法及其应用[J].信号处理,2009,25(6):958 – 962.
Kong Guojie, Zhang Peilin, Xu Longtang, Wu Feng. Adaptive filter algorithm based on empirical mode decomposition and its application [J]. Signal Processing, 2009, 25(6): 958 – 962. (in Chinese)
- [10] 李关防,惠俊英.基于经验模态分解的模式域 MVDR 方法研究[J].电子学报,2009,37(5):942 – 946.
Li Guanfang, Hui Junying. A study of mode domain MVDR algorithm based on empirical mode decomposition [J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(5): 942 – 946. (in Chinese)
- [11] 韩松,何利铨,孙斌,姜浩,彭小俊.基于希尔伯特-黄变换的电力系统低频振荡的非线性非平稳分析及其应用[J].电网技术,2008,32(4):56 – 60.
Han Song, He Liquan, Sun Bin, Jiang Hao, Peng Xiaojun. Hilbert-Huang transform based nonlinear and non-stationary analysis of power system low frequency oscillation and its application [J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 56 – 60. (in Chinese)
- [12] 罗小东,贾振红,王强.一种新的变步长 LMS 自适应滤波算法[J].电子学报,2006,34(6):1123 – 1126.
Luo Xiaodong, Jia Zhenhong, Wang Qiang. A new variable step size LMS adaptive algorithm [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(6): 1123 – 1126. (in Chinese)
- [13] 谢胜利,周元建.一种新自适应滤波快速算法及其在多路回波消除中的应用[J].电子学报,2003,31(2):276 – 279.
Xie Shengli, Zhou Yuanjian. A new adaptive filtering algorithm and its application in stereophonic acoustic echo cancellation [J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(2): 276 – 279. (in Chinese)
- [14] Arnd Frech, Amer Zakaria, Stephan Braun, Peter Russer. Am-

bient noise cancelation with a time-domain EMI measurement system using adaptive filtering[A]. 2008 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility & 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility[C]. Singapore: IEEE EMC Society, 2008: 534 – 537.

[15] Kasra Payandehjoo. Suppression of unwanted harmonics using integrated complementary split-ring resonators in nonlinear transmission line frequency multipliers[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(4): 931 – 941.

作者简介



张兰勇 男, 1983 年 10 月出生于河北省保定市, 2006 年于哈尔滨工程大学获得学士学位, 2009 年于哈尔滨工程大学获得硕士学位, 现为哈尔滨工程大学博士生, 研究方向为电磁兼容预测与测试、随机信号处理.

E-mail: zlyalf@sina.com



刘 胜 男, 1957 年 8 月出生于吉林省镇赉, 2000 年于哈尔滨工程大学获得博士学位, 现为哈尔滨工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为人工智能理论及其应用、随机系统最优估计与控制、电磁兼容等. 在国内外发表学术论文 120 余篇.

E-mail: liu.sh@163.com