基于小波分析的自适应谱线增强信号提取

嵇 斗1 王向军1 张怀亮2

1海军工程大学电气与信息工程学院,湖北武汉 430033

2 海军装备部,北京 100071

摘 要:提出一种基于小波多分辨率分析的自适应谱线增强算法,利用小波多分辨率分析理论,有效地将微弱 的窄带轴频电场信号从宽带背景噪声中分离出来,把信号和噪声正交分解于不同的频率范围中,从而减少了自 适应滤波器的阶数,提高了算法的收敛速度和稳定性。利用该方法对船模产生的轴频电场实测数据进行了处理, 实验结果表明该算法可以有效地提取舰船轴频电场信号。

关键词:小波变换;多分辨率分析;极低频;电场;自适应谱线增强;舰船 中图分类号:TN912 文献标志码:A 文章编号:1673-3185(2010)02-74-04

Signal Extraction of Adaptive Spectral Enhancement Based on Wavelet Multi–Resolution Analysis

Ji Dou¹ Wang Xiang-jun¹ Zhang Huai-liang²

College of Electric and Information Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China
 2 Naval Armament Department of PLAN, Beijing 100071, China

Abstract: The digital signal processing method for adaptive spectral enhancement (ALE) with wavelet multi-resolution analysis algorithm can extract the characteristic signal of the shaft-rate modulated electric field from the environment field. The method analyzes the signal and noise into different frequency ranges with wavelet analysis, and the adaptive filter's orders can be reduced, thus the speed of convergence and the performance of system are improved. Using this method, the measured data of the shaft-rate modulated electric field of a ship are processed. Both the experimental and measured data show that the method is effective.

Key words: wavelet transform; multi-resolution analysis; extremely low frequency; electric field; adaptive spectral enhancement; ship

1 引 言

舰船腐蚀与防腐电流受到螺旋桨转动调制, 在海水中形成以螺旋桨转速为基频的向外传播的 极低频电场^[1,2],该电场对于目标识别具有重要意 义。公开的资料表明,舰船在海水中产生的极低频 电场,一般小于 30 Hz^[3],轴频电场信号随着传播 距离的增大迅速衰减,因此很容易被环境噪声所 掩盖,给检测带来了困难。 为提取有用信号,可考虑采取将受到污染的 信号通过一个滤波器进行过滤。自适应滤波器^[4] 具有自动调节参数的能力,可提供比固定滤波器 更佳的滤波性能。相关文献提出基于快速横向滤 波器(FTF)算法的自适应谱线增强技术^[5],在轴频 电场信号处理中取得了很好的效果,但较多的阶 数使自适应系统收敛速度过慢,且在实际应用中, 所分析的信号通常包含一些尖峰或突变部分。对 这种信号进行消噪处理时,仅用自适应滤波,不能

收稿日期: 2009-05-07

基金项目:湖北省自然科学基金资助项目(2007ABA360)

作者简介: 嵇 斗(1975 –),男,讲师。研究方向:电路与系统。E-mail:jidou@ vip. sohu. com 王向军(1973 –),男,副教授。研究方向:信号处理

有效地区分有用信号和噪声干扰,从而不能有效 地保存有用信号中的尖峰和突变成分。针对以上 问题,在自适应消噪中引入小波分析。小波分析能 同时在时、频域中对信号进行分析,且具有自动变 焦的功能,因而能有效地区分信号中的突变部分 和噪声。本文提出一种基于小波多分辨率分析的 自适应消噪算法,它先将原信号在多个尺度上分 解与重构,每个尺度上的信号是原信号在不同频 带上的带通信号,选择不同尺度上信号作线性组 合,对组合以后的信号进行自适应滤波,使其与期 望信号之间的均方误差为最小,从而达到消噪的 目的。在实验室中测量船模轴频电场数据,利用自 适应小波算法,可以有效地从背景噪声中分离出 微弱轴频电场特征信号,提高舰船电场信号的检 测能力。

2 基于 MALLAT 算法的正交小波 多分辨率分析

MALLAT 快速算法在电力系统的谐波分析中 应用较为广泛^[6],其基本原理是对原始的数字信 号序列进行多分辨率分析^[7]:

$$a_{j+1}(n) = \sum_{k} h(k-2n)a_{j}(k)$$
 (1)

$$d_{j+1}(n) = \sum_{k} g(k-2n) a_{j}(k)$$
 (2)

$$a_{L}(n) = 2^{L/2} \sum_{k} f(kT_{s}) \sin c((n-k)T_{s})$$
(3)

小波的多分辨率分析将信号按一定的尺度进 行划分,不同频率的信号被划分到不同的频段中, 然后对各个子频段进行重构,从而分离出轴频信 号和干扰信号(图 1),实际测量时工频干扰最强。 在分解到一定尺度时,可以将低频段的结果近似 地认为就是所求轴频信号。当分离到一定精度时, 将所有的 d_j(n)(j=0,1,2,3…)的值置为 0,即只保 留 a_j(n)的分解值,按照式(3)进行重构,就可以得 出各个采样时刻的轴频信号基波值。



图 1 小波多分辨率分解

由于采样点序列以及所选用的滤波器的长度 是有限的,因此在计算 a_j(n)以及 d_j(n)时会遇到 边界问题。随着分解不断进行,重构时误差会不断 增大。因此,必须对 a_j(n)以及 d_j(n)进行边界拓 延,一般的做法是利用周期拓延。虽然周期拓延会 导致信号在分解过程中的失真,但是其低频部分 的误差可以在重构中消除掉,从而实现低频部分 的精确重构,可以满足提取低频轴频电场信号的 要求。

3 基于小波多分辨率分析的自适应 谱线增强

自适应谱线增强(ALE)已广泛应用于频谱估 算,谱线估计以及窄带检测等领域。在窄带信号加 上宽带信号的情况下,用自适应谱线增强方法无 需独立的参考信号就能将信号分离出来^[8],它是 将含嗓信号作为原始信号,将延迟时间 D 的同样 信号作为参考信号,延迟的作用是使噪声信号去 相关,而有用信号不去相关。自适应滤波器的输出 y(n)就是所需要的有用信号。

自适应谱线增强框图自适应谱线增强算法见 相关文献^[9]。将多分辨率分析引入自适应滤波器, 用小波多分辨率分析对自适应谱线增强的输入进 行正交变换,将输入含噪信号 x(n)正交分解到多 尺度空间,利用小波的时频局部特性,减小了自适 应谱线增强输入矢量自相关阵的谱动态范围,从 而减少了自适应滤波器的阶数,提高了算法的收 敛速度和稳定性。小波多分辨率分析与自适应谱 线增强的关系,如图 2 所示。



图 2 基于小波多分辨率分析的自适应谱线增强原理

4 船模实验与轴频电场信号特征 提取

将实验船模 (螺旋桨的转速约为 300 r/min, 对应低频电场信号约为 5 Hz)用塑料支架固定在 无磁性实验水池中,池中装有由工业盐调制的人 造海水(电导率为 3.65/Ω·m⁻¹)。三轴电场传感器 为银—氯化银电极,电极间距为 25 cm,分别用来 测量船模电场的横向、纵向和垂直方向上的分量。 银—氯化银电极测得的电位差信号经前置放大

(仪表级放大器 AD620, 放大倍数为1000 倍)后 传送到 16 位 AD 采样板 (采用 ADS7805,采样频 率为1000 Hz)的输入端进行采样,经过信号调理 后将采集到的数据存入计算机。实际测量时,船模 的下半部分和螺旋桨浸泡在海水中。先将三轴电 场传感器固定在水下船模尾部正下方、测量螺旋 桨不转动时两电极间的电位差,即测量环境背景 干扰。然后启动船模上电机,转动螺旋桨,即测量 螺旋桨调制 ELF 信号。背景噪声和轴频信号的垂 直分量的测量结果如图 3 所示。其中,图 3(a)为 背景垂直分量的电场,图 3(b)为船模垂直分量的 轴频电场,图3(c)为背景垂直分量的电场频谱 图,图3(d)为船模垂直分量的轴频电场频谱图。 由图 3 可知,干扰信号主要是环境工频电场及其 谐波分量,由于轴频电场信号幅度较小,很难从环 境噪声分辨出来。





舰船的轴频电场是一个窄带周期信号,而背 景噪声带宽却很宽。对于这种混合信号,在没有预 知噪声参考信号的情况下,应用自适应谱线增强 器能够很好地将窄带的微弱轴频电场信号从背景 噪声中分离出来。



运用基于小波多分辨率分析的自适应谱线增 强算法对图 3 的实验测量数据进行处理,从环境 噪声中提取出微弱的电场特征信号。具体运算流 程见参考文献[9],船模电场 Ez 分量尺度 5 近似 波形如图 4 所示,频谱图如图 5 所示。理论计算表 明,5 Hz 低频分量的幅值大约为 50 Hz 工频干扰 幅值的 1/200~1/1000,其幅值很小。由图 5 可以 看到,对于这样微弱的信号,经过自适应谱线增强 的数字处理后,能够很大程度地压制背景噪声,从 中提取出有用的轴频电场特征信号,可以清晰的 看出 5 Hz 低频分量的存在。

5 结束语

通过实验测得舰船轴频电场数据,应用基于 小波多分辨率分析的自适应谱线增强的数字信号 处理方法,无需噪声参考信号,直接利用测量到的 数据就能够实时有效地将微弱的轴频电场特征信 号从环境背景噪声中分离出来,大大提高了舰船 轴频电场的检测能力,为舰船水下电场信号分析 研究及其相关应用提供了一个有效的信号处理方 法。

参考文献:

[1] HOLTHAM P M, JEFFREY I G. ELF signature control[C] //Conf Proc UDT. Europe, 1996:486-489.

- [2] 宋东安,邹忠栾.舰船水下极低频电磁信号的控制[J].国 外舰船工程,1999(8):22-24,40.
- [3] 陈雪俫,程锦房.基于舰船轴频电场的目标识别[J].水雷 战与舰船防护,2005(2):38-42.
- [4] 何振亚. 自适应信号处理[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [5] 卢新城,龚沈光,林春生. 自适应谱线增强在舰船轴频电场信号检测中的应用[J].数据采集与处理,2004,19(4):
 438-440.
- [6] 成礼智,王红霞,罗勇.小波的理论与应用[M].北京:科 学出版社,2004.
- [7] 周林,夏雪,万蕴杰,等. 基于小波变换的谐波测量方法 综述[J]. 电工技术学报,2006,21(9):68~74.
- [8] 姚天任,孙洪. 现代数字信号处理[M]. 武汉:华中科技 大学出版社,1999.
- [9] 唐斌,董绪荣.小波多分辨率分析及其在自适应消噪中的应用[J].装备指挥技术学院学报,2007,18(1):75-78.