

# 基于小波模极大值能量的船舶轴频电场检测

贾亦卓,姜润翔,龚沈光

(海军工程大学兵器工程系,湖北武汉 430033)

**摘要:** 为了有效地从海洋环境电场背景中检测微弱的船舶轴频电场信号,对轴频信号小波模极大值的尺度分布特性进行了分析,在得出轴频观测信号中噪声模极大值的幅度和分布稠度均随尺度增大而减小的结论的基础上,通过提取最大分解尺度的模极大值能量作为特征值,利用滑动检测方法对目标进行检测,并且避免了小波模极大值的重构过程,因而计算量小,检测速度较快.最后,分别使用实测数据和仿真数据对该算法进行了验证,结果表明此算法在低信噪比情况下具有较好的检测效果,当SNR为-10.8dB时仍然具有79%的检测率.

**关键词:** 船舶;轴频电场;小波变换;模极大值;检测

**中图分类号:** TP274 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2014)03-0592-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.03.026

## Detection of Ship Shaft-Rate Electric Field Signal Based on Wavelet Modulus Maximum Power

JIA Yi-zhuo, JIANG Run-xiang, GONG Shen-guang

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China)

**Abstract:** In order to effectively detect ship shaft-rate(SR) electric signal, the wavelet modulus maximum's scale-distribution characteristics of the measured SR electric signal is analyzed. Based on the analysis result that the intensity and distribution density of noise's wavelet modulus maximum decreases along the scale, a detecting algorithm was proposed to extract the modulus maximum power in the highest scale as feature value to detect the target glidingly. As the wavelet reconstruction is avoided in the de-noising process using wavelet modulus, the detecting algorithm proposed can be easily achieved by hardware. In the end, the effectiveness of the proposed method is verified both using measured data and simulated data, and simultaneity compared with the detecting algorithm based on wavelet packet entropy. The verified result shows that the detecting algorithm provides a better detecting performance, and it can keep detection rate of 79% when the SNR is -10.8dB.

**Key words:** ships; shaft-rate electric field; wavelet transformation; wavelet modulus maximum; detect

## 1 引言

船舶在海水中航行时,会在周围产生轴频电场信号,该信号因频率较低(1~7Hz),在海水中衰减较慢,且在频域上具有明显线谱特征<sup>[1]</sup>,被广泛应用于船舶的远程探测.理论和实测数据表明<sup>[2,3]</sup>,轴频电场信号通常比较微弱,其量级在近场一般为 $10^{-4}$ V/m~ $10^{-5}$ V/m,极易被近似服从高斯分布的海洋环境电场信号淹没<sup>[4]</sup>.特别是随着海况的升高,船舶电场信号的检测难度将大大增加,因此,需要对轴频电场信号的检测方法进行深入研究.

小波变换具有良好的时域-频域局部化特点,可对

谐波信号进行快速、准确的测量和定位.近几年,国内有学者分别从小波包<sup>[5]</sup>和小波包熵<sup>[6]</sup>等角度对轴频电场的检测方法进行研究,其实质均为在小波包阈值降噪的基础上进行目标检测,检测效果依赖于信号频率特征范围内的噪声能量,如果噪声能量较大,检测概率将大大降低,并且在降噪的过程中,需要对信号进行重构,因此,计算量大,不易于实时检测和硬件实现.针对上述问题,本文在充分利用信号与噪声小波模极大值随尺度分布差异的基础上,提出了一种基于小波模极大值能量的船舶轴频电场检测方法,并通过实测数据和仿真数据对该检测方法进行验证.

## 2 轴频信号小波模极大值的尺度分布特性

### 2.1 二进小波变换的模极大值

设  $|Wf(2^j, n)|$  为信号在  $j(j \geq 0)$  尺度下的二进小波变换, 如果满足  $|Wf(2^j, n)| > |Wf(2^j, n-1)|$ , 且  $|Wf(2^j, n)| > |Wf(2^j, n+1)|$ , 则称  $(j, n)$  为该尺度下的模极大值点,  $|Wf(2^j, n)|$  为该点处的模极大值。

Mallat 等人根据 Lipschitz 指数可以描述信号奇异性的特点, 通过跟踪小波变换模极大值在影响锥内的跨尺度变化, 对信号奇异点的 Lipschitz 指数进行估计. 对二进小波而言, 设小波母函数  $\psi(t)$  具有  $M$  阶消失矩,  $f(t)$  的小波变换  $Wf(2^j, x)$  的所有模极大值点都位于锥体  $|x - x_0| \leq C2^j$  内, 其中  $C$  为常数<sup>[7]</sup>. Lipschitz 指数和小波模极大值有如下关系:

$$\log_2 |Wf(2^j, x)| \leq \log_2(K) + \alpha j, \alpha < M \quad (1)$$

式中,  $K$  为常数,  $\alpha$  为 Lipschitz 指数. 由式(1)可知, 若  $f(t)$  的  $\alpha > 0$ , 则该函数的小波变换模极大值将随尺度增大而增大, 反之, 则减小. 对于高斯白噪声, 它的 Lipschitz 指数  $\alpha = -0.5 - \epsilon$ ,  $\epsilon > 0$ . 同时, 高斯噪声的小波变换也是一个高斯过程, 其平均稠度  $D_j$  与尺度存在如下关系:

$$D_j = \frac{1}{2^j \pi} \left( \frac{\|\psi^{(2)}\|}{2\|\psi^{(1)}\|} + \frac{\|\psi^{(1)}\|}{\|\psi\|} \right) \quad (2)$$

式中,  $\psi^{(1)}$ 、 $\psi^{(2)}$  分别为小波  $\psi(t)$  的一、二阶导数. 由式(2)可知, 伴随尺度的增加, 高斯噪声的模极大值数量逐渐减半. 这为利用小波模极大值的尺度分布特性对轴频信号进行检测提供了理论依据, 下面将结合实测数据对船舶轴频信号和背景噪声的小波模极大值尺度分布差异进行分析.

### 2.2 轴频信号小波模极大值的尺度分布特性分析

2010 年和 2012 年, 利用自主研发的水下电场测量系统, 分别在渤海和南海海域测得大量船舶轴频电场数据. 该测量系统主要由全固态 Ag/AgCl 电极、信号调理电路和数据采集电路组成. 其中, 电极在轴频电场测量频段内(1~10Hz)的等效噪声为  $1\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ; 信号调理电路主要包括放大电路和滤波电路; 采集电路的采样频率为 40Hz, 数据经过 A/D 转换, 存储到安全数码卡内. 渤海和南海的试验海域水深分别约为 20m 和 15m, 海底均为泥沙质地, 测量期间, 浪级在 1~2 级. 两次海上试验共获得百余航次的轴频电场和上百小时的环境电场背景信号, 为深入研究船舶轴频电场特性打下良好基础.

在进行小波变换时, 首先需要选择合适的小波基. 理想的小波基应当具有良好的对称性或反对称性、较短的支撑和较高的消失矩, 然而一个小波基很难同时

具有以上特性, 因此, 综合考虑计算速度和对实测轴频信号的分析效果等因素, 本文选用 db5 小波基进行小波分解. 图 1 为渤海测量到的某中型船舶的轴频电场信号, 该船排水量 2000t 左右, 船速约为 12kn, 船舶和船艏的通过时间依次为 46s 和 58s, 船舶距离测量体的正横距离约为 80m; 图 2 为南海测量到的两艘小型船舶依次通过时的轴频电场信号, 两艘小船的排水量约为 400t, 船速为 10kn 左右, 第一艘船的船艏和船艏通过时间分别为: 180s 和 190s, 第二艘船的船艏和船艏通过时间分别为 260s 和 272s, 船舶距离测量体的正横距离在 50m 左右.

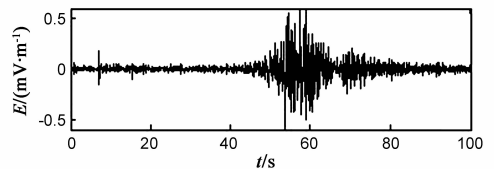


图1 某中型船舶的轴频电场(渤海)

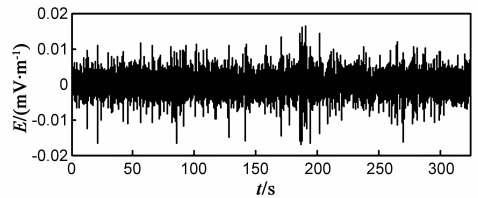


图2 两艘小型船舶的轴频电场(南海)

图 3 和图 4 分别为图 1 和图 2 所示轴频信号在各尺度上小波模极大值的分布情况. 从图 3 和图 4 可以看到, 当分解尺度  $j = 1 \sim 4$  时, 船舶轴频信号的小波模极大值随分解尺度增大基本不变, 当  $j = 5$  时, 轴频信号的模极大值有变小的趋势. 这是由于小波变换的实质是将信号依次映射到不同尺度的小波域中, 随着尺度的增大, 小波函数的中心频率会向低频方向移动, 当到达某一尺度时, 信号的小波变换将会到达最大值, 之后, 随尺度的增大其模极大值将会减小; 相对于轴频信号,

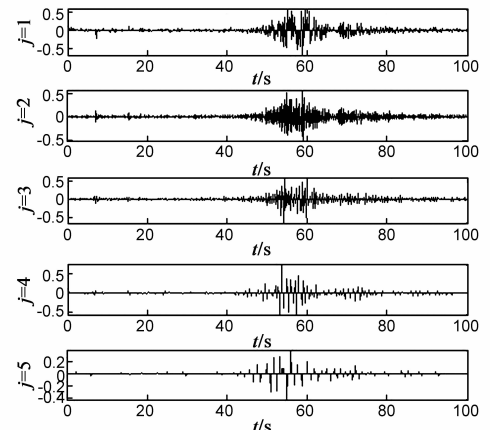


图3 图1中信号的小波模极大值分布

噪声的模极大值随尺度增大而减小;同时,由于信号中叠加上有较多噪声,小波模极大值的分布稠度均随尺度增大而明显减小,在最大分解尺度( $j=5$ )时,小波模极大值基本均分布在目标通过期间。

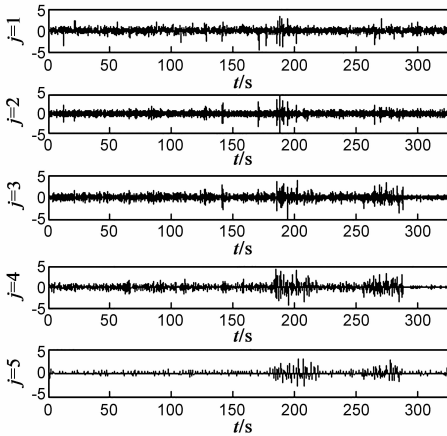


图4 图2中信号的小波模极大值分布

### 3 船舶轴频信号的检测方法

根据轴频信号与噪声信号模极大值随尺度分布的差异,通过在有限的尺度范围内搜索目标信号模极大值曲线,提取最大尺度上的小波模极大值能量作为特征值,利用滑动检测方法<sup>[8]</sup>对目标进行实时检测,即每隔一定的时间间隔计算一次特征值,当连续若干时间的特征值超过动态阈值则判定目标信号出现.具体检测步骤如下:

**步骤1 搜索小波模极大值.**设第  $n$  时刻前  $N$  点的测量信号为  $\{x_{n+1-N}, x_{n+2-N}, \dots, x_n\}$ ,首先,根据信号的特征频率范围,选取合适的最大分解尺度  $J$ ,对  $N$  点测量信号进行多孔小波变换<sup>[9]</sup>;其次,从尺度  $J$  开始搜索模极大值曲线<sup>[10]</sup>,直到  $j=J-L$  尺度形成模极大值曲线,由于在低尺度上信号的小波模极大值易被噪声淹没, $L$  取值不能过大;仅保留在模极大值曲线  $J$  尺度上的模极大值点。

**步骤2 特征提取.**提取最大尺度  $J$  上的模极大值能量和为特征,定义第  $n$  个特征值  $T_n$  为

$$T_n = \frac{1}{Q} \sum_{i=1}^Q |w_i^J|^2 \quad (3)$$

式中,  $|w_i^J|$  为  $J$  尺度上模极大值的模;  $Q$  为模极大值的数量。

**步骤3 目标检测.**从初始时刻开始,每隔  $K$  个数据点计算一次当前特征值  $T_n$ ,当  $T_{n-1} > U_{n-1}$  且  $T_n > U_n$  时,则判定目标出现在当前时刻.假定  $T$  服从独立正态分布,根据正态随机变量超过其均值与三倍方差之和的概率为 0.13%,取第  $n$  时刻的动态阈值  $U_n$  为

$$U_n = \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M T_{n-i} + 3 \left[ \frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M \left( T_{n-i} - \frac{1}{M} \cdot \sum_{i=1}^M T_{n-i} \right)^2 \right] \quad (4)$$

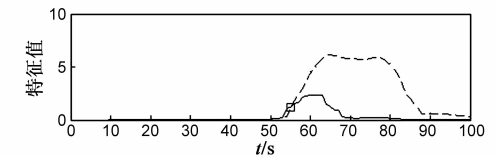
式中,  $M$  为预定值;  $n = M+1, M+2, \dots$

## 4 算例

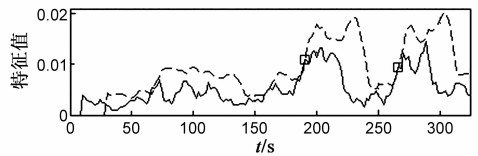
为检验算法的有效性,分别利用实测数据和仿真数据对其进行检验.确定算法的主要参数如下:选用 db5 小波作为小波函数;小波模极大值降噪的最大分解尺度  $J=4$ ;搜索尺度数量  $L=2$ ;采样点数  $N=10 \times f_s$  ( $f_s$  为测量信号的采样频率);数据间隔  $K=1 \times f_s$ ;计算阈值的数据长度  $M=20$ 。

### 4.1 实测数据的信号检测

图1和图2所示轴频信号的检测效果分别如图5(a)和图5(b)所示.为对比本文检测算法的检测效果,图6(a)和图6(b)分别给出文献[6]对相应信号的检测效果.其中,图5(a)~图6(b)中的实线表示特征值,虚线表示阈值,□号表示在此时刻检测到目标.对比图5(a)和图6(a)可以看到,在信噪比较高时,两种算法均有很好的检测效果(本文检测方法的目标确认时刻为 55s,文献[6]为 53s).在低信噪比的情况下,对比图5(b)和图6(b)可以看到,由于文献[6]是建立在小波包阈值降噪的基础上对目标进行检测,因而该方法对信噪比依赖较高,在低信噪比条件下,特征值受环境噪声

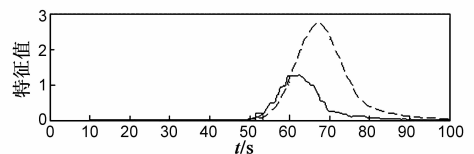


(a) 本文检测算法对图1所示轴频信号的检测效果

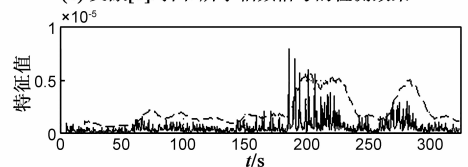


(b) 本文检测算法对图2所示轴频信号的检测效果

图5



(a) 文献[6]对图1所示轴频信号的检测效果



(b) 文献[6]对图2所示轴频信号的检测效果

图6

影响较大而出现波动,致使检测失效;本文检测方法能够充分利用信号的特征信息,因而对低信噪比的实测信号仍具有较好的检测效果,本文检测方法的目标确认时刻依次为 188s 和 266s.

#### 4.2 仿真数据的信号检测

两次试验期间,试验海域的海况较好,未获得复杂海况下的船舶轴频电场数据.为进一步验证本文算法的检测效果,下面利用仿真数据进行检验.选取船舶通过测量体之前的环境电场信号作为仿真噪声,将轴频信号和仿真噪声进行线性叠加,通过对仿真噪声乘以不同的系数来调节信噪比(SNR),SNR 计算公式为  $20 \times \log(\text{目标信号的峰-峰值}/\text{仿真噪声的峰-峰值})$ .图 7 为一组渤海的实测数据,其中,船舶的轴频信号出现在 450~560s,将该轴频信号每隔 2 秒叠加到 0~400s 之间线性放大后的噪声中,得到 100 组数据,对每组数据进行滑动检测.其中一组混合信号见图 8,此时目标信号的中心位置在 170s,SNR = -11.1dB.从图 8 中可以发现目标信号完全被背景信号淹没,从时域上很难分辨出目标信号.

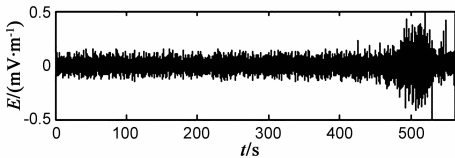


图7 海上电场测量数据(渤海)

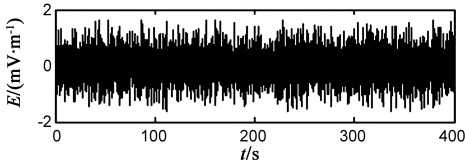
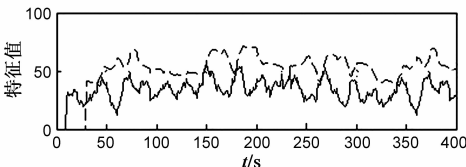
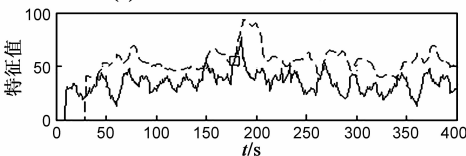


图8 混合信号(SNR=-10.8dB)

图 9(a)为本文检测方法对环境电场仿真信号的检测效果,从图中可以看出,检测阈值能够较好地跟踪背景噪声的变化,具有一定的适应能力,并且没有出现虚警.图 9(b)为本文算法对叠加后的仿真数据(即图 8 信号)的检测效果,从图中可以清晰发现在目标出现时间



(a) 环境电场信号的检测效果



(b) 混合信号检测效果(SNR=-10.8dB)

图9

内检测到目标信号,目标的确认时刻为 182s.表 1 给出本文算法和文献[6]算法在不同信噪比下的检测效果对比,可以看到:在低信噪比(SNR = -2.6dB)时,两种算法均表现出较好的检测效果;但随着信噪比的降低,文献[6]算法的检测效果急剧下降,本文算法的检测效果相对稳定,当 SNR = -6.5dB 时,相对文献[6]的检测率提高了 41%,在 SNR = -10.8dB 时仍具有 79% 的检测率.

表 1 不同信噪比下 2 种算法的检测效果

SNR/dB		检测率/%	虚警率/%	漏检率/%
-2.6	本文算法	100	0	0
	文献[6]算法	98	2	0
-6.5	本文算法	98	2	0
	文献[6]算法	57	12	31
-10.8	本文算法	79	15	6
	文献[6]算法	0	43	57

## 5 结束语

本文根据轴频电场信号与噪声的小波模极大值随尺度分布的差异,通过在有限的尺度范围内搜索小波模极大值曲线,提取最大尺度上的小波模极大值能量作为特征值,然后,采用滑动检测方法对目标进行检测.通过实测数据和仿真数据对该检测方法进行验证表明,此方法在低信噪比情况下,能较好地检测到目标信号,检测效率高.同时,此算法避免了对信号进行重构,因而计算量小,为进一步硬件实现船舶轴频信号的检测提供了新的方法.

## 参考文献

- [1] 林春生,龚沈光.舰船物理场[M].北京:兵器工业出版社,2007:237-243.
- [2] 卢新城,王婷,陈兴刚,等.海船轴频电场建模方法研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2012,36(1):168-170.  
Lu X C, Wang T, Chen X G, et al. Research on the modeling method of a sea going vessel's shaft-rate electric fields[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2012, 36(1): 168-170. (in Chinese)
- [3] 谭浩,龚沈光,贾利.基于神经网络的船舶轴频电场特征控制实验[J].华中科技大学学报(自然科学版),2012,40(4):84-87.  
Tan H, Gong S G, Jia L. Controlling shaft-rate electric field using RBF neural networks[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2012, 40

- (4):84-87. (in Chinese)
- [4] 包中华, 龚沈光, 马珂, 等. 实测海洋环境电场正态性检验[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2010, 34(4):776-780.  
Bao Z H, Gong S G, Ma K, et al. Test of normality for measured marine environment electric field data[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2010, 34(4):776-780. (in Chinese)
- [5] Bao Z H, Hu P, Gong S G, et al. Detection of harmonics submerged in heavy and coloured noise based on wavelet packet decomposition[A]. ICCSIT[C]. Chendu: IEEE, 2010. 208-210.
- [6] 胡鹏, 龚沈光, 胡英娣. 基于小波包熵的船舶轴频电场信号检测[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(11):15-18.  
Hu P, Gong S G, Hu Y D. Detection of ship shaft-rate electric field signal using wavelet packet entropy[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2011, 39(11):15-18. (in Chinese)
- [7] 连可, 王厚军, 龙兵. 一种基于小波变换模极大值的估计 Lipschitz 指数新方法[J]. 电子学报, 2008, 36(1):106-110.  
Lian K, Wang H J, Long B. A novel method of measuring Lipschitz exponent based on wavelet transform modulus maxima[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(1):106-110. (in Chinese)
- [8] 姜润翔, 史建伟, 龚沈光. 基于尺度-小波能量谱的船舶水压场信号检测[J]. 电子学报, 2009, 37(1):122-125.  
Jiang R X, Shi J W, Gong S G. Ship hydrodynamic pressure field signal detection based on scale wavelet power spectrum[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(1):122-125. (in Chinese)

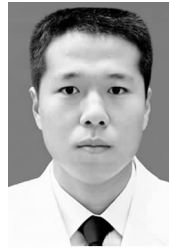
- [9] 彭诚, 叶大田. 小波变换模极大值重建方法消除胃电检测中的运动伪迹[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(3):428-431.

Peng C, Ye Da T. Motion artifact cancellation in electrogastragrams using reconstruction of the wavelet transform modulus maxima[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2007, 47(3):428-431. (in Chinese)

- [10] 梁桂兰, 徐卫亚, 谈小龙, 等. 岩石高边坡安全监测数据的小波变换去噪处理[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(9):1837-1844.

Liang G L, Xu W Y, Tan X L, et al. Denosing processing of safety monitoring data for high rock slope based on wavelet[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(9):1837-1844. (in Chinese)

### 作者简介



贾亦卓 男, 1985 出生, 河北石家庄人. 现为海军工程大学博士研究生, 从事目标水下电磁场特性的研究.

E-mail: tyututy@126.com.



姜润翔(通信作者) 男, 1982 出生, 河南尉氏人. 现为海军工程大学讲师, 从事军用目标特性探测领域的研究.

E-mail: jiang\_runxiang@163.com