

基于尺度一小波能量谱的船舶水压场信号检测

姜润翔, 史建伟, 龚沈光

(海军工程大学兵器工程系, 湖北武汉 430033)

摘 要: 为了有效地从风浪背景中检测船舶水压场信号, 本文利用连续小波变换分析了实测海浪水压场与船舶水压场的尺度一小波能量谱, 根据两者的能量差异, 提取某一特征尺度范围内的能量和为特征, 采用滑动检测方法对信号进行实时检测. 通过实测数据和仿真数据对该检测算法进行验证, 结果表明此方法在低信噪比情况下, 能较好的检测到目标信号.

关键词: 海浪; 船舶; 水压场; 小波变换; 尺度一小波能量谱

中图分类号: TH878 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112(2009)01-0122-04

Ship Hydrodynamic Pressure Field Signal Detection Based on Scale Wavelet Power Spectrum

JIANG Runxiang, SHI Jianwei, GONG Shengguang

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

Abstract: In order to effectively detect ship hydrodynamic pressure field signal from wind wave background, a target detection method has been proposed based on the feature extracted according to the difference of scale wavelet power spectrum between the ship hydrodynamic pressure field signal and the wave hydrodynamic pressure field signal. By means of this method, it is possible to recognize whether target signal is involved or not in received signal. The effectiveness of the method is verified by a real target signal with additive real noise signal, especially under the high sea state and condition of low SNR.

Key words: ocean wave; ship; hydrodynamic pressure field; wavelet transform (WT); scale wavelet power spectrum

1 引言

水雷水压引信是藉运动船舶在其周围水域所引起的压力变化而动作的, 海浪水压场是其主要背景干扰. 理想的水压引信, 不仅应能在海浪水压场的作用下维持自己的生存, 而且还应能在高海况背景中, 检测出船舶水压场信号的存在. 时域上, 海浪水压场信号的幅值通常是船舶水压场信号幅值的几倍甚至几十倍. 频域上, 船舶水压场的能量主要集中在 0.05Hz 左右, 海浪水压场的能量主要集中在 0.5Hz 以下, 这为从能量方面提取特征提供了可能. 海浪水压场与船舶水压场信号的对数功率谱估计见图 1. 从图 1 中可以看出两者的能量在低频部分存在混叠. 随着海况的升高, 海浪水压场的最大能频向低频方向移动, 混叠程度加剧. 因此高海况下, 检测目标及防止误动的难度大大增加.

考虑到海浪获得能量或者是损失能量都是一个缓慢的过程, 传统的船舶水压场信号检测方法将海浪水压场近似视为平稳信号^[1-4], 实际上, 海浪水压场信号受

多种因素的影响, 是非平稳信号. 小波变换在分析非平稳信号时能获得比传统傅立叶变换更显著的效果, 本文利用连续小波变换分析了实测海浪水压场与船舶水压场信号, 在此基础上, 提出了基于尺度一小波能量谱的船舶水压场信号实时检测方法.

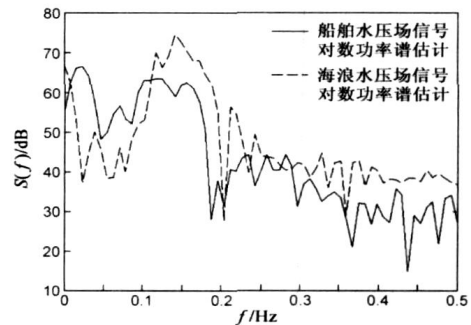


图 1 海浪水压场及船舶水压场信号对数功率谱估计

2 连续小波变换及尺度一小波能量谱

设 $\varphi(t)$ 为平方可积函数, 即 $\varphi(t) \in L^2(R)$, 如果

其傅立叶变换 $\Psi(\omega)$ 满足容许条件

$$C_{\varphi} = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

则 $\varphi(t)$ 称为母小波。将 $\varphi(t)$ 进行伸缩和平移变换, 设其伸缩因子(尺度因子)为 a , 平移因子为 b , 可得到一组函数 $\varphi_{a,b}(t)$

$$\varphi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \varphi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

$\varphi_{a,b}(t)$ 称为小波基函数。

给定平方可积的信号 $x(t)$, 则 $x(t)$ 的连续小波变换定义为

$$WT_x(a,b) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \varphi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中, a, b 和 t 均是连续变量。

定义 $|WT_x(a,b)|^2$ 为信号的尺度图, 它是随尺度 a 与位移 b 的能量分布。根据小波变换系数的幅值平方在 (a,b) 平面上的加权积分等于信号在时域的总能量, 有下式成立

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = C_{\varphi}^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} a^{-2} |WT_x(a,b)|^2 da db \quad (4)$$

将 $C_{\varphi}^{-1} a^{-2} |WT_x(a,b)|^2$ 看作 (a,b) 平面的能量密度函数, 则

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt = C_{\varphi}^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} a^{-2} E(a) da \quad (5)$$

$$E(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |WT_x(a,b)|^2 db$$

式中, $E(a)$ 反映了信号的能量沿尺度方向的分布情况^[5,6], 定义为尺度—小波能量谱。

3 海浪水压场及船舶水压场尺度小波能量谱分析

2007年6~7月测得南海某海域海浪水压场与船舶水压场, 此次试验得到了不同浪级下的海浪水压场数据和不同航速、吨位的船舶水压场数据, 为深入研究海浪水压场与船舶水压场的物理特性打下良好基础。

在进行小波变换时, 选择不同的小波基函数会得到不同的结果, 小波变换系数的大小实际上反映了信号局部与对应的小波基函数的相似程度, 系数越大, 表明信号的局部与对应的小波基越相似, 因此所选择的小波基函数外形应与海浪水压场信号特征相似。文中采用 Morlet 小波基函数, 根据海浪水压场与船舶水压场信号能量分布特点, 尺度范围从 1~128, 步长为 1, 即 $a = j, j = 1, 2, \dots, 128$ 。

海浪水压场及其尺度—小波能量谱如图 2 所示, 船舶水压场及其尺度—小波能量谱如图 3 所示。图 3(a) 为某中型客轮通过时的水压场, 图 3(b) 为某小型运输

船通过时的水压场。

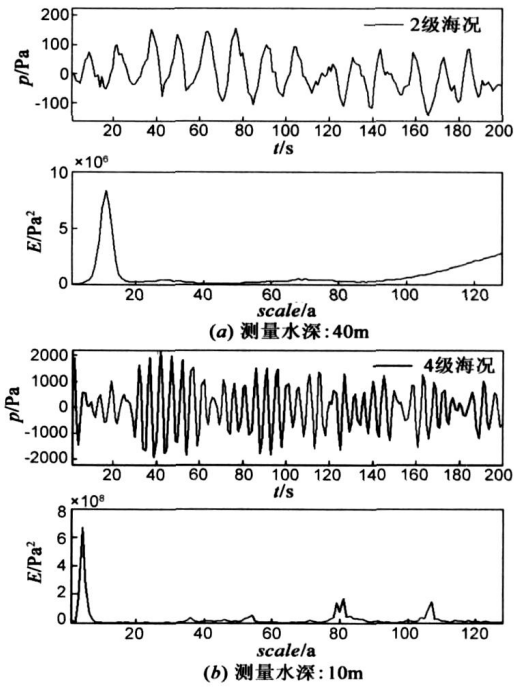


图2 海浪水压场信号及其尺度—小波能量谱

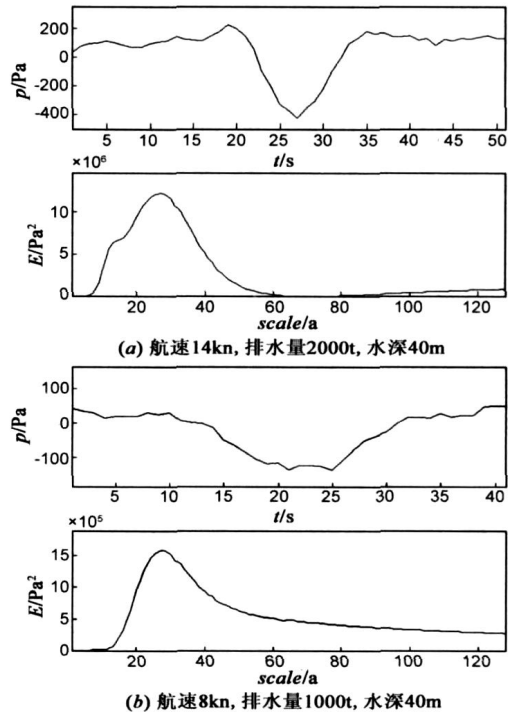


图3 船舶水压场信号及其尺度—小波能量谱

从图 2 和图 3 中可知, 海浪水压场与船舶水压场的尺度能量都比较集中, 海浪水压场的能量主要集中在特征尺度 4~15 范围内, 而船舶水压场的能量主要集中在特征尺度 20~40 范围内。通过对大量实测海浪水压场与船舶水压场进行尺度—小波能量谱分析, 发现大部分海浪水压场的能量主要集中在特征尺度 4~10 范

围内, 而船舶水压场的能量主要集中在特征尺度 25~35 范围内, 同时在特征尺度 25~35 范围内船舶水压场的能量通常高于海浪水压场的能量, 这为以尺度一小波能量谱为特征检测船舶水压场信号提供了理论依据。

4 实时检测方法

根据海浪水压场与船舶水压场尺度一小波能量谱的差异, 提取某一特征尺度范围内的能量和为特征, 利用滑动检测方法^[4]对信号进行实时检测, 每隔一秒钟计算一次特征值, 当连续若干秒钟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:

1. 求解尺度一小波能量谱 设第 i 时刻前 N 点的海浪水压场信号为 $x_{i+1-N}, x_{i+2-N}, \dots, x_i$, 计算尺度一小波能量谱 $E(a)$

$$E(a) = \sum_{m=1}^N |WT_x(a, m)|^2 \quad (6)$$

其中

$$WT_x(a, m) = |a|^{-1/2} \Delta T \sum_{n=1}^N x_{i+n-N} \varphi^* \left(\frac{(n-m)}{a} \right) \quad (7)$$

式中, $m, n = 1, 2, \dots, N, N$ 为采样点数, ΔT 为采样间隔。

(2). 提取特征 提取某一特征尺度 $c \sim d$ 范围内的尺度一小波能量和为特征, 定义第 i 时刻的特征值为 T_i

$$T_i = \sum_{a=c}^d E(a) \quad (8)$$

(3). 目标信号检测 从初始时刻开始, 每隔一秒钟计算一次特征值 T , 当 $T_{i-1} > U_{i-2}$ 且 $T_i > U_{i-1}$ 时, 则判定目标信号出现在第 i 时刻。假定 T_i 服从独立正态分布, 根据正态随机变量超过其均值与三倍均方差之和的概率为 0.0013, 取第 i 时刻的动态阈值 U_i 为

$$U_i = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M T_{i-k} + 3 \left[\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M \left(T_{i-k} - \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M T_{i-k} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

M 为某预定值。

5 算例

为检验算法的有效性, 分别用实测数据和仿真数据对其进行检验。确定算法主要参数如下: 采样间隔 $\Delta T = 1s$, 采样点数 $N = 48$, 计算阈值的数据长度 $M = 100$, 取 $c = 25, d = 35$ 。

5.1 实测数据的信号检测算例

在南海某海域测得大量实测船舶数据, 该海域水深 40m 左右, 测量期间, 浪级 1-2 级。目标船舶为某中型

运输船和货船, 运输船排水量 1000t 左右, 航速 8kn, 其混合海浪水压场信号及其检测效果见图 4。图 4(a) 给出了实测混合信号, 图 4(b) 给出了检测算法的计算结果, 图 4(b) 中实线表示特征量, 虚线表示阈值, * 号表示在此时刻检测到目标。货船通过时的混合信号及其检测效果见图 5, 货船排水量 1200t 左右, 航速 10kn。从图 4 和图 5 中可以清晰的发现, 在船舶水压场信号出现的时间段内检测到该信号的存在。

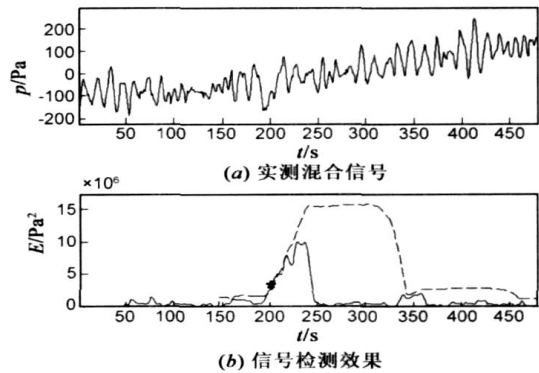


图4 实测混合信号及其检测效果

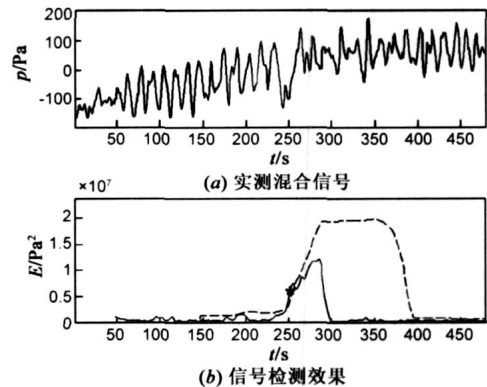


图5 实测混合信号及其检测效果

5.2 仿真数据的信号检测算例

由于本次试验未获得大浪情况下的船舶水压场数据, 为检验此方法在低信噪比条件下的检测效果, 利用低海况下的船舶水压场数据与高海况下的海浪水压场数据进行线性叠加来模拟实测混合信号。目标船舶为某中型运输船, 其水压场信号见图 6, 海浪水压场信号见图 7。将实测目标信号的中心位置每隔 3 秒加在背景信号的 150~450s 之间, 得到 100 组数据, 对每组数据进行滑动检测, 检测率为 98%。其中一组混合信号见图 8, 此时目标信号中心位置加在 422s 位置, 信噪比为 -16.5dB, 信噪比计算公式为 $20 \times \log(\text{目标信号振幅峰-峰值} / \text{背景信号振幅峰-峰值})$ 。从图 8 中可以发现目标信号完全被背景信号淹没, 从时域上很难检测到目标信号。检测效果见图 9, 从图中可以清晰发现在目标出现时间内检测到目标信号。图 10 为纯海浪水压场信号

的检测效果图, 从图中可以看出, 没有出现虚警。

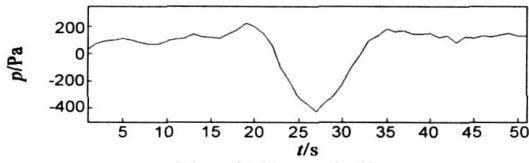


图6 船舶水压场信号

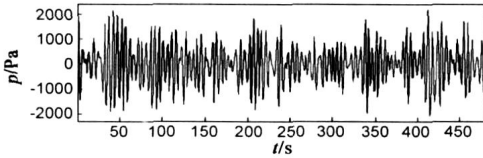


图7 海浪水压场信号

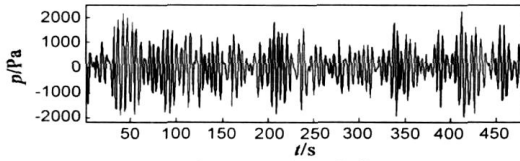


图8 仿真混合信号

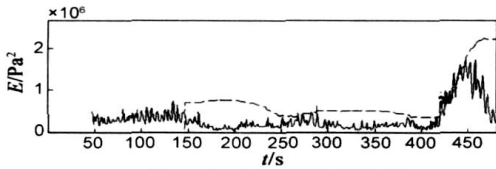


图9 混合信号检测效果

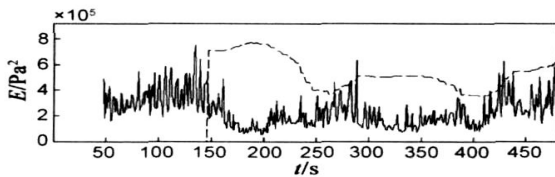


图10 海浪水压场信号检测效果

6 总结

本文首先利用连续小波变换分析了实测海浪水压场与船舶水压场的尺度一小波能量谱, 根据两者的能量差异, 提取某一特征尺度范围内的能量和为特征, 采用滑动检测方法对信号进行实时检测。通过实测数据和仿真数据对该检测算法进行验证, 结果表明此方法在低信噪比情况下, 能较好的检测到目标信号, 为船舶水压场信号的检测提供了新的途径。

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. 250-264.
- [2] 姜润翔, 姜礼平, 龚沈光. 基于 AR 模型和神经网络的舰船水压信号检测方法[J]. 数据采集与处理, 2006, 21(4): 459-462.

Jiang run xiang, Jiang Li ping, Gong Sherr guang. Hydraulic pressure signal detection of ship under wind wave background based on AR model and ANN[J]. Data Acquisition and Processing, 2006, 21(4): 459-462. (in Chinese)

- [3] 林春生, 邓大新, 任德奎. 风浪背景下舰船水压场信号的自适应 AR 模型预测滤波[J]. 海洋学报, 2004, 26(4): 133-138.
- [4] LIN Churr sheng, DENG Da xin, REN De kui. Adaptive AR model prediction filtering for ship hydraulic pressure signal on wind wave background[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(4): 133-138. (in Chinese)
- [4] 姜礼平, 龚沈光. 水中目标信号的实时检测方法研究[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(6): 40-43.
- Jiang Li ping, Gong Sherr guang. Research on real time detection of underwater target signal[J]. Journal of Naval University of Engeneering, 2003, 15(6): 40-43. (in Chinese)
- [5] 胡广书. 现代数字信号处理教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004. 239-240.
- [6] 程军圣, 于德介, 杨宇等. 尺度一小波能量谱在滚动轴承故障诊断中的应用[J]. 振动工程学报, 2004, 17(1): 82-85.
- Cheng Jur Sheng, Yu de jie, Yang yu, et al. Application of Scale Wavelet Power Spectrum to Fault Diagnosis of Rolling Bearings[J]. Journal of Vibration Engineering, 2004, 17(1): 82-85. (in Chinese)

作者简介:



姜润翔 男, 1982 年 4 月出生于河南尉氏。现为海军工程大学博士研究生, 从事军用目标特性探测领域的研究。
E-mail: jiang_runxiang@163.com



史建伟 男, 1978 年 6 月出生于黑龙江哈尔滨。现为海军工程大学博士研究生, 从事军用目标特性探测领域的研究。