

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.07.019

## 基于小波滤波与 RBF 网络的微弱磁场信号检测

张坚<sup>1</sup>, 林春生<sup>1</sup>, 陈文须<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学兵器工程系, 武汉 430033; 2. 海军 92840 部队 17 分队, 山东 青岛 266405)

**摘要:** 针对水中兵器检测船舶磁场信号时信噪比较低的问题, 提出基于小波滤波与 RBF 神经网络的微弱磁场信号检测算法。根据船舶磁场信号的时频特征, 对采集的信号进行小波分解, 提取最后一层的低频分量, 滤除高频噪声; 并采用样本数据对 RBF 网络进行学习, 利用学习好的 RBF 网络对含噪信号进行处理, 提取船舶目标特征信号。通过计算机仿真结合实测数据对算法进行了检验。结果表明: 该算法可以显著提高信噪比, 增强了对微弱磁场信号的检测能力。

**关键词:** 信号检测; 微弱磁场信号; 小波变换; RBF 网络

**中图分类号:** TP274 **文献标志码:** A

## Detection of Weak Magnetic Signal Based on Wavelet Transform and RBF Neural Network

Zhang Jian<sup>1</sup>, Lin Chunsheng<sup>1</sup>, Chen Wenxu<sup>2</sup>

(1. Dept. of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. No. 17 Team, No. 92840 Unit of Naval, Qingdao 266405, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low signal noise ratio (SNR) in detecting magnetic signal of ship, a detection algorithm based on wavelet transform and RBF neural network was proposed. Based on the characteristic of magnetic signal of ship, the signal was decomposed by wavelet transform, and the low frequency components in last level were taken out to filter out the high frequency noise. Then the RBF neural network was trained by sampled data. The signal polluted by noise was processed by the trained RBF neural network. The results of simulation show that the algorithm increases SNR markedly, and enhances the detection ability of weak magnetic signal of ship.

**Keywords:** signal detection; weak magnetic signal; wavelet transform; RBF neural network

### 0 引言

船舶磁场信号是水中兵器探测的重要信号源。水下磁探测因其可靠性高, 抗干扰能力强而被广泛应用于各种水下探测装备中<sup>[1]</sup>, 也逐渐成为各国学者研究的热点。在实际探测中, 由于船舶磁场信号会受到环境磁噪声的干扰, 实测信号的信噪比通常都小于 1, 直接从时域波形中很难检测到微弱的船舶磁场信号, 这就需要研究能有效提高信噪比的检测算法。针对这一问题, 笔者提出基于小波滤波与 RBF 网络的微弱磁场信号检测算法, 并通过计算机仿真对算法的有效性进行了检验。

### 1 小波变换对船舶磁场信号的滤波

#### 1.1 船舶磁场信号的时频特征分析

船舶磁场的通过特性曲线具有明显的特征, 这些特征可以有效用于对目标船舶的识别。典型船舶磁场纵向特性曲线具有以下特征<sup>[2]</sup>: 磁场信号分布主要限制在 2 倍船长左右的范围内, 沿纵向一般有 1~3 个半波; 当横坐标  $y$  较小时, 磁场横向分量的量值比其它 2 个分量小, 即在龙骨下方, 磁场横向

分量存在死区。当横坐标  $y$  取值和水深相当时, 磁场横向分量取值较大。

船舶磁场纵向特性曲线是船舶磁场的时域特征, 但在实际应用中, 目标信号往往被环境磁干扰所淹没, 实测信号的信噪比通常都小于 1, 这就需要对船舶磁场的频域特征进行分析, 结合频域特征对目标信号进行处理。

通过对国外各种典型船舶的磁场信号进行频域分析, 可以得出以下结论<sup>[2]</sup>: 1) 船舶磁场信号属极低频信号, 频率范围一般为 0~1.0 Hz, 大中型船舶在经济航速以下航行时, 上限频率一般在 0.1 Hz 左右。小型船舶高速航行时, 上限频率一般也不超过 1 Hz。大中型船舶磁场信号的峰值频率一般在 0.025 Hz 左右。2) 当距离不变时, 低速航行船舶磁场信号的频率成分较少, 带宽较窄, 谱峰频率较低。随着航速的增加, 带宽变宽, 谱峰频率向高频方向扩展。3) 当航速不变时, 近距离船舶磁场信号的频率成分较多, 带宽较宽, 有时出现多个谱峰频率; 随着距离的增加, 高频分量逐渐衰弱, 带宽变窄, 谱峰个数减少且向低频方向移动。

收稿日期: 2011-02-07; 修回日期: 2011-03-11

基金项目: 国防装备预研基金项目资助(9140A01010109)

作者简介: 张坚(1983—), 男, 河北人, 博士, 从事军用目标探测、微弱磁场信号检测研究。

1.2 小波变换的滤波作用

小波变换具有良好的时频局部化特性, 通过小波多分辨率分析, 将信号按不同尺度展开, 可以在不同分辨率下对信号进行分析和处理<sup>[3]</sup>。对信号  $x(t)$  作 3 层小波分解的示意图如图 1。

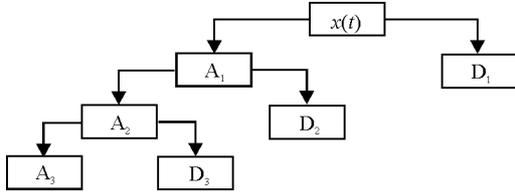


图 1 3 层小波分解示意图

信号  $x(t)$  的连续小波变换定义为

$$W_x(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi_{a,b}^*(t)dt \quad (1)$$

其中:  $\psi_{a,b}(t) = (1/\sqrt{a})\psi[(t-b)/a]$  为小波基函数;  $a$  为尺度因子;  $b$  为平移因子。

在实际应用中通常需要计算信号的离散小波变换, 即令  $a = a_0^j$ ,  $b = nb_0a_0^j$  ( $a_0 \neq 1$ ,  $b_0 > 0$ ,  $j$  和  $n$  为整数)。若取  $a_0 = 2$ , 并将  $t$  轴用  $b_0$  归一化, 有

$$\psi_{j,n}(t) = 2^{-j/2}\psi(2^{-j}t - n)$$

则信号  $x(t)$  的离散小波变换为:

$$W_x(j, n) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\psi_{j,n}^*(t)dt \quad (2)$$

通常采用 Mallat 算法进行离散小波变换的计算, 其递推公式如下

$$d_{j,k} = \sum_{m \in Z} h_{m-2k}^* d_{j-1,m}$$

$$c_{j,k} = \sum_{m \in Z} g_{m-2k}^* d_{j-1,m}$$

式中:  $d_{j,k}$  和  $c_{j,k}$  分别为第  $j$  层分解的低频系数和高频系数;  $h_n$  和  $g_n$  为小波分解的低通滤波器和高通滤波器。

由小波变换的时频特性可以看出, 当分解层数足够多时, 小波变换具有带通滤波器的性质, 可以视为窄带滤波系统。而船舶磁场信号属极低频信号, 因此, 笔者采用小波变换对实测的磁场信号进行预滤波: 对受噪声污染的船舶磁场信号进行  $J$  层小波分解, 提取第  $J$  层的低频分量。通过选择合适的分解层数  $J$ , 可以在滤除高频磁噪声的同时, 尽可能多的保留目标信号的信息。

2 RBF 网络基本原理

径向基函数 (radial basic function, RBF) 网络是

一种常用的前馈神经网络。从结构上看, 它属于 3 层前馈网络, 包括输入层、输出层和隐含层, 如图 2<sup>[4]</sup>。输入层节点的作用是传递输入信号到隐含层节点; 隐含层节点由类似高斯函数的具有辐射状作用的函数构成; 输出层节点的传递函数通常是简单的线性函数。

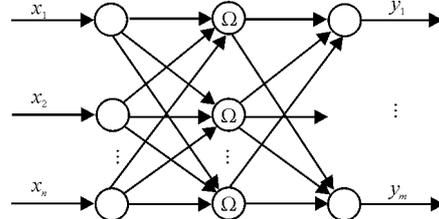


图 2 RBF 网络结构图

隐含层节点中的基函数对输入信号在局部产生响应, 即当输入信号靠近基函数的中央范围时, 隐含层节点将产生较大的输出, 因而这种网络具有局部逼近能力, 所以 RBF 网络是局部逼近网络, 具有学习速度快的优点, 其基函数常用的是高斯函数:

$$u_i = \exp[-\|x - c_i\|^2 / 2\sigma_i^2], \quad i = 1, 2, \dots, h \quad (3)$$

式中:  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  是  $n$  维输入向量;  $c_i$  是第  $i$  个基函数的中心, 与  $x$  具有相同的维数;  $\sigma_i^2$  是方差, 它决定了该基函数围绕中心点的宽度;  $h$  是隐含层节点数;  $\|x - c_i\|$  是向量  $x - c_i$  的范数, 它通常表示  $x$  和  $c_i$  之间的距离;  $u_i$  是第  $i$  个隐含层节点的输出。

RBF 网络的输出是隐含层节点输出的线性组合, 即

$$y_j = \sum_{i=1}^h w_{ji}u_i - \theta_j = W_j^T U, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

式中:  $W_j^T = [w_{j1}, w_{j2}, \dots, w_{jh}, -\theta_j]^T$ ,  $U = [u_1, u_2, \dots, u_h, 1]^T$ 。

RBF 网络有 3 个参数需要学习: 基函数的中心、方差和隐含层与输出层间的权值。其学习过程可分为 2 个阶段, 首先根据所有输入样本决定隐含层各节点的高斯核函数的中心值  $c_i$  和方差  $\sigma_i^2$ ; 当决定了隐含层的参数后, 再根据样本, 采用一定的学习算法求出输出层的权值向量  $W_j$ 。RBF 网络有多种学习方法, 其中最常用的有 4 种: 随机选取中心法、自组织选取中心法、有监督选取中心法和正交最小二乘法。笔者选取正交最小二乘法进行 RBF 网络的学习, MATLAB 神经网络工具箱中用来设计径向基网络的 solverb 函数就是根据此方法编写的。按梯度下

降法修正网络的权值，并为每个加权调节量加上一项正比于前次加权变化量的动量因子<sup>[5]</sup>。

### 3 算法验证

#### 3.1 试验数据的获取

采用计算机仿真结合实测数据对文中算法在微弱磁场信号检测中的有效性进行验证。在磁传感器与目标的距离远大于目标尺寸的情况下，目标磁场可以用磁偶极子产生的磁场来表示<sup>[2]</sup>，则磁性目标在磁传感器处产生的磁场可以表示为：

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} r^{-3} [3r^{-2}(M \cdot r)r - M] \tag{5}$$

式中： $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$  为真空磁导率； $M$  为磁性目标的磁矩矢量； $r$  为目标到磁传感器的距离。通过设定一组参数，可以由上述磁偶极子模型仿真生成船舶磁场信号，如图 3。

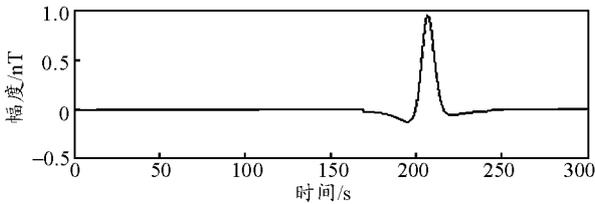


图 3 船舶磁场仿真信号

在某海域、某深度下，进行了大量的环境磁场测量试验，测量仪器使用光泵磁传感器，采集了 50 段数据样本。系统采样频率为 10 Hz，每段样本的时间长度为 300 s。取其中一个样本与船舶磁场仿真信号叠加后得到混合信号，如图 4。可以看出，由于受环境磁噪声的干扰，船舶磁场信号完全被噪声所淹没，直接从混合信号中无法检测到船舶目标。

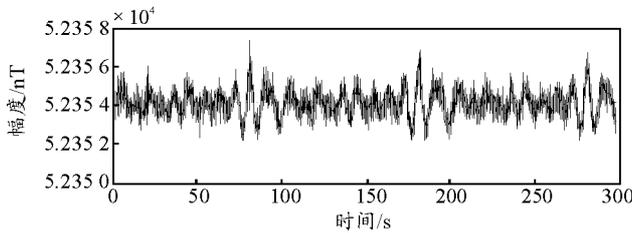


图 4 船舶磁场与环境磁噪声的混合信号

#### 3.2 微弱磁场信号检测

分别采用 RBF 网络和小波滤波结合 RBF 网络 2 种方法对试验信号进行处理。

1) RBF 网络处理方法：在所采集的 50 个样本中，取 30 个样本来训练网络。RBF 网络的结构为 1-5-1，网络输出为滤除环境磁噪声后的信号。当训练到达 80 次后，误差可以满足要求精度。然后利用

训练好的网络权值，将混合信号作为网络的输入向量，得到滤除环境磁噪声后的网络输出，如图 5。可以看出，虽然信噪比较混合信号有所提高，但目标信号仍不明显，无法准确检测到目标。

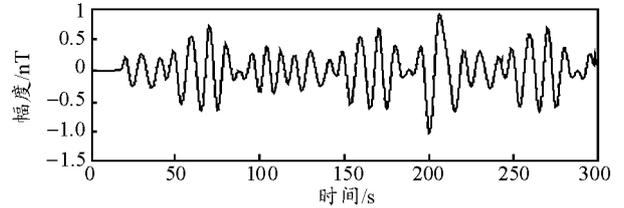


图 5 RBF 网络处理后的输出信号

2) 小波滤波结合 RBF 网络处理方法：先采用 db8 小波函数对采集的 50 个样本和混合信号进行 3 层小波分解，提取第 3 层的低频分量，可在滤除高频磁噪声的同时，尽可能多地保留目标信号的信息；将第 3 层低频分量作为网络的输入向量，取 30 个样本按第 1 种方法学习；再利用训练好的网络权值，将小波滤波后的混合信号作为输入向量，得到滤除环境磁噪声后的网络输出，如图 6。可见，经过笔者算法处理后，210 s 处的船舶目标信号变得非常明显，使用简单的幅度门限检测就可准确检测到目标。

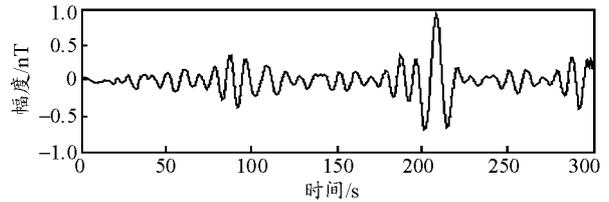


图 6 小波滤波结合 RBF 网络处理后的输出信号

### 4 结束语

笔者采用小波滤波结合 RBF 网络对船舶磁场信号进行处理，可以在有效滤除环境磁噪声的同时，最大限度地保留船舶磁场的特征信号。仿真结果表明，小波滤波与 RBF 神经网络的微弱磁场信号检测算法可以显著提高信噪比，增强对微弱磁场信号的检测能力。今后还应根据船舶磁场的实测数据对算法进行进一步验证。

### 参考文献：

- [1] 张炜, 程锦房. 一种三轴磁传感器正交误差校正的简便方法[J]. 兵工自动化, 2009, 28(12): 75-78.
- [2] 林春生, 龚沈光. 舰船物理场[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2007.
- [3] 杨福生. 小波变换的工程分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [4] 高隽. 人工神经网络原理及仿真实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [5] 张静. 基于 RBF 网络的微分先行 PID 控制器[J]. 兵工自动化, 2007, 26(9): 60-61.