

一种海洋磁异常检测噪声抑制算法

费春娇^{①②③} 张群英*^{①②} 吴佩霖^{①②③} 方广有^{①②} 朱万华^{①②} 许鑫^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(电磁辐射与探测技术院重点实验室 北京 100190)

^③(中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 海洋磁异常检测是海洋科学观测、海底资源勘探、国防安全等领域的重要手段之一,但复杂环境磁场噪声增加了目标磁探测的难度,研究各种磁场噪声机理及抑制方法对于测量精度的提升具有重要意义。该文提出一种磁异常检测噪声抑制算法,利用通用型和无限水深条件下的海浪磁场模型分别对海浪感生磁场噪声进行估算,通过谱减法和小波去噪相结合的方法对磁异常信号中的海浪和地磁场噪声进行滤除。该文利用2015年8月我国南海某海域的海洋磁场观测数据对该算法进行了验证。结果表明,该方法可以滤除大部分的海浪和地磁场噪声,在频段0.4~0.8 Hz范围内海浪的分布明显减少,较大幅度地改善了时域波形,突出了目标产生的磁异常信号,信噪比可提升近11 dB。该方法计算复杂度低,实时性强且易于实现,可为海洋磁异常检测的噪声抑制提供一种有效手段。

关键词: 海洋磁测; 海浪磁场模型; 谱减法; 小波分析

中图分类号: O441.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)11-2779-08

DOI: 10.11999/JEIT180026

Noise Suppression Algorithm for Ocean Magnetic Anomaly Detection

FEI Chunjiao^{①②③} ZHANG Qunying^{①②} WU Peilin^{①②③} FANG Guangyou^{①②}
ZHU Wanhua^{①②} XU Xin^{①②}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Beijing 100190, China)

^③(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Marine magnetic anomaly detection is one of the basic means of marine scientific observation, exploration of undersea resources, national defense and security. However, the complexity of the magnetic field noise increases the difficulty of the magnetic detection. It is of great significance to study various magnetic field noise mechanisms and suppression methods for the improvement of measurement accuracy. In this paper, the wave magnetic field model under general and infinite depth conditions is used to estimate the noise induced by sea waves respectively. The wave and geomagnetic noise in the magnetic anomaly signal is filtered out by the combination of spectral subtraction and wavelet. In order to verify the validity of the algorithm, the ocean magnetic field in a sea area of South China Sea in August 2015 is observed. The results show that this method can filter out most of the wave and geomagnetic field noise. The wave distribution in the frequency range of 0.4~0.8 Hz is obviously reduced, the waveform in the time domain is greatly improved, the magnetic anomaly signal of the target is highlighted. Signal to noise ratio can be increased by nearly 11 dB. The proposed method has the advantages of low computational complexity, strong real-time performance and easy implementation, which can provide an effective measure for noise suppression of marine magnetic anomaly detection.

Key words: Marine magnetic anomaly detection; Wave induced magnetic field model; Spectral subtraction; Wavelet analysis

1 引言

含有磁性材料的目标体因其本身的永久磁性和地磁场的磁化作用,会导致物体周围的地磁场发生

局部畸变,形成一种准静态磁场,即磁异常信号(magnetic anomaly signatures)^[1,2]。随着近些年我国海洋经济的蓬勃发展,近海海域常有他国潜艇、无人潜航器等目标进行入侵、渗透、侦查和破坏等活动,对我国领土安全构成了严重威胁。利用海洋磁检测技术可以根据入侵目标产生的磁异常信号对

收稿日期: 2018-01-09; 改回日期: 2018-04-23; 网络出版: 2018-05-10

*通信作者: 张群英 qyzhang@mail.ie.ac.cn

水下目标进行探测、定位和追踪。相比于其他非声探潜检测手段,如雷达探测技术、激光探测技术、红外探测技术等,海洋磁异常检测的被动工作方式具有隐蔽性好,可靠性较高,较快的传播速率、较小的信号衰减以及浅海区域较强的抗干扰能力^[3]等优点,可为我国海域内重要设施提供安全警戒和防御保障,是近海地区可靠的探测手段。

海洋磁异常目标探测可通过机载平台(有人机、无人机)和海底磁场传感器网络实现。由于平台传感器选择的类型不同,输出信号特征会有很大差异。如机载平台测得磁异常信号所在频段为0.04~0.6 Hz,而水下磁异常信号一般集中在0.0015~0.5000 Hz^[4]。大量的实验分析表明海水运动噪声与目标磁异常信号在量级、频带上非常接近,尤其在飞行器执行低空磁探飞行时,海浪噪声是主要的干扰源之一。同时,地磁场及其与太阳风之间复杂的相互作用会产生低频磁噪声,该磁场变化周期为0.2~1000 s,幅度从0.1 nT到几十个nT,是制约目标探测的精度的重要因素。因此对海浪磁场和地磁场噪声进行抑制和处理很有必要。七、八十年代美国海军^[5,6]研究了机载平台的水下目标磁异常信号的频带范围,验证了正交基匹配滤波方法去噪的可行性,推导了探测概率与地磁场的关系。文献^[7,8]研究了基于自回归模型的白化滤波方法,实现了地磁背景噪声的有效抑制,提高了检测率。Otnes^[9]利用参考磁场传感器形成磁场梯度,在海洋背景下噪声抑制水平可达到20 dB,但是系统存在时钟漂移问题,导致信噪比降低。加拿大国防部^[10]等相关机构在海底固定站利用辅助磁场传感器和水压传感器去除海浪磁场噪声,背景噪声可降低10~20 dB,但该方法需要谨慎选择参考点位置。瑞典学者Richardsen等人^[11]通过海上实验测得无磁异常目标时水下背景磁场数据,分别采用参考滤波法和线性预测法对地磁场噪声的抑制效果进行了对比。前者噪声抑制能力和参考测量点的位置有关,而后者无需传感器之间进行数据交换。意大利Faggioni等人^[12]为解决系统采集时钟偏差问题,利用谱减法抑制背景磁场噪声,但由于参考噪声测量点选择问题,处理后的目标信号会引入新的干扰噪声,系统探测虚警概率增大。

本文提出了一种海洋磁异常信号检测噪声抑制算法,首先分别利用通用型海浪磁场模型和无限水深条件下的海浪磁场模型对海浪感生磁场进行了模拟,采用谱减法滤除了海浪噪声,再利用小波的多尺度分析对带噪磁异常信号进行小波分解和重构,进一步滤除了残余海浪噪声和地磁场噪声。为了验

证该算法的有效性,本文利用一个位于海底的3分量磁测系统,对我国南海某海域的海洋磁场进行了长达7天的观测。结果表明,当目标经过磁场传感器上方时,该算法可以清晰地观测到目标产生的磁异常信号,背景噪声降低了近11 dB,可以为海洋磁场测量数据的噪声抑制提供一种更加有效的工具。

2 算法原理

2.1 磁异常信号检测

目标在地磁场中产生的磁异常信号可以看作是独立的磁场源作用的结果,其磁距表现为在地磁场中产生的感应磁矩以及目标所用材料带来的永久磁矩的总和。在工程实践中,探测距离基本能达到目标体最大尺寸的3倍以上。此时,磁异常体可以看作磁偶极子,所产生的磁异常信号的矢量表示为^[13]

$$\mathbf{B}(\mathbf{m}, \mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3(\mathbf{r} \cdot \mathbf{m})\mathbf{r} - r^2\mathbf{m}}{r^5} \quad (1)$$

其中, μ_0 为自由空间磁导率, \mathbf{m} 为目标总体磁矩矢量, \mathbf{r} 为目标到测量点处的距离矢量, m, r 分别表示磁矩 \mathbf{m} 和距离 \mathbf{r} 的幅值。当目标沿着 x 轴正方向以速度 v 匀速直线运动,始终保持磁矩大小和方向不变,如图1所示。

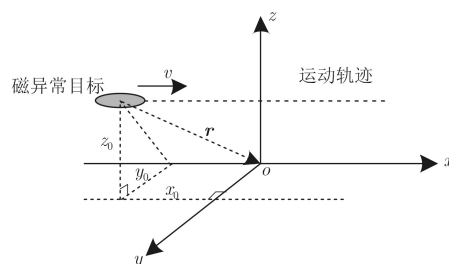


图1 磁性目标运动检测模型示意图

图1中目标与固定观测点(零点)之间存在相对运动,可以实现对目标的有效探测。在零点处观测的磁异常信号可表示为

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \frac{\mu_0}{4\pi r^5} \begin{bmatrix} 3r_x^2 - r^2 & 3r_x r_y & 3r_x r_z \\ 3r_x r_y & 3r_y^2 - r^2 & 3r_y r_z \\ 3r_x r_z & 3r_y r_z & 3r_z^2 - r^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $m_k, r_k (k = x, y, z)$ 分别表示目标磁距和目标到观测点的距离在 x, y, z 方向上的3个分量,磁异常目标运动轨迹可以表示为时间的函数 $\mathbf{r} = v \cdot t \cdot \mathbf{x} + c_1 \mathbf{y} + c_2 \mathbf{z} (c_1, c_2$ 为常数)。

2.2 谱减法去噪

在海洋磁异常信号检测过程中时,磁场传感器

不可避免地会接收到来自于环境的噪声，如地磁场，海水运动感生磁场、岩石和矿体的静磁噪声等。地磁场和岩石圈噪声可以利用其空间相关性等方法进行预处理，但是海浪因运动切割地磁场产生的感应磁场与磁异常信号频带相近，是水下磁异常探测的主要噪声源之一，滤除难度较大。本文拟采用谱减法对带噪磁异常信号进行处理。其原理框图如图2所示，基本思想是假定加性噪声与短时平稳信号彼此相互独立，将带噪信号的功率谱与已知的噪声功率谱相减，从而得到较为纯净的目标信号频谱。谱减法具有实时性强，易于实现，且算法复杂度低等优点。

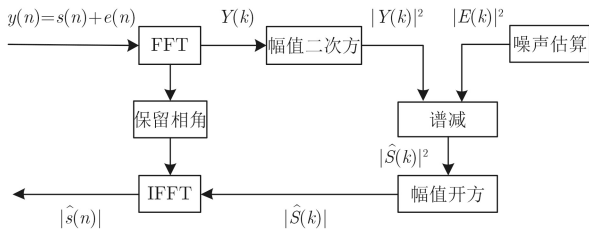


图2 谱减法的基本原理框图

带噪磁异常信号可以表示为

$$y(n) = s(n) + e(n), 0 \leq n \leq N-1 \quad (3)$$

其中， $s(n)$ 为纯净的磁异常信号， $e(n)$ 为检测到的背景磁场噪声，本文中认为该噪声主要成分是海浪运动切割地磁场感生的磁场信号。分别对 $y(n)$ ， $s(n)$ ， $e(n)$ 进行傅里叶变换，得到 $Y(k)$ ， $S(k)$ ， $E(k)$ ，其中

$$\left. \begin{aligned} Y(k) &= |Y_k| \exp(j\theta_k) \\ S(k) &= |S_k| \exp(j\gamma_k) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据式(3)， $y(n)$ 的功率谱可以表示为

$$|Y^2(k)| = |S^2(k)| + |E^2(k)| + S(k)E^*(k) + S^*(k)E(k) \quad (5)$$

由于海浪噪声与磁异常信号彼此相互独立，可以得到去除海浪噪声后的磁异常估计信号 $\hat{S}(k)$ 满足

$$|\hat{S}(k)|^2 = \begin{cases} |Y(k)|^2 - |E(k)|^2, & |Y(k)|^2 \geq |E(k)|^2 \\ 0, & |Y(k)|^2 < |E(k)|^2 \end{cases} \quad (6)$$

忽略海浪磁场模型相位的影响，运用 $Y(k)$ 的相位 θ_k 代替 $S(k)$ 的相位 γ_k ，再进行傅里叶反变换有

$$\hat{s}(n) = \text{IFFT} \left\{ |\hat{S}_k| \exp(j\theta_k) \right\} \quad (7)$$

在利用谱减法对带噪磁异常信号去噪的过程中，重点在于怎样对海浪磁场噪声 $E(k)$ 进行准确地估计，又不引入外部噪声，从而实现信噪比的提高。本文中 $E(k)$ 可以通过选取不同的海浪磁场模型估算得到。

2.3 海浪磁场模型

本文采用了改进型的基于Stokes 1阶波的通用海浪磁场模型^[4]。令 x 轴为海水水平前进方向， z 轴竖直向上， x ， y ， z 满足右手螺旋关系，建立如图3所示的坐标系。

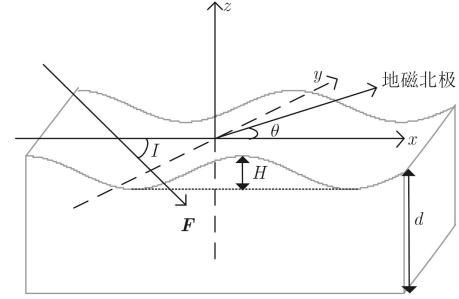


图3 海浪运动产生感应磁场的数学模型

其中，海浪高度 $H = 2a$ (a 为波浪竖直方向振幅)， d 为海洋深度， I 为磁倾角， θ 为海浪前进方向与地磁北极的夹角， \mathbf{u} 为海浪的运动速度矢量， $\mathbf{F} = F(\cos I \cos \theta \mathbf{i} + \cos I \sin \theta \mathbf{j} - \sin I \mathbf{k})$ 为地磁场的方向矢量 (\mathbf{i} ， \mathbf{j} ， \mathbf{k} 分别为3个坐标轴的单位矢量)。空气和海水的介电常数分别为 $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi F/m$ ， $\varepsilon_2 = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ($\varepsilon_r = 78$)， ω 为海浪频率， $k = \omega/c$ 为波数。线性波浪运动的速度势满足：

$$\phi = \frac{ga}{\omega} \cdot \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad (8)$$

由于 $\mathbf{u} = \nabla \phi$ ，可以推导出海浪运动的速度为

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \frac{\partial \phi}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \mathbf{k} = \frac{2\pi a}{T \sinh(kd)} \\ &\cdot [\cosh k(z+d) \mathbf{i} + j \sinh k(z+d) \mathbf{k}] \\ &\cdot \exp(j\omega t - jkx) \end{aligned} \quad (9)$$

海水是无旋流体，满足 $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$ ， $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ ，其电流密度可以表示为 $\mathbf{J} = \sigma [\mathbf{u} \times (\mathbf{F} + \mu \mathbf{H})] \approx \sigma (\mathbf{u} \times \mathbf{F})$ ，根据Maxwell方程推导可得

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = \begin{cases} 0, & z < 0 \\ -\sigma (\mathbf{F} \cdot \nabla) \mathbf{u}, & z > 0 \end{cases} \quad (10)$$

等式右边化简可得 $(\mathbf{F} \cdot \nabla) \mathbf{u} = M \cdot \exp(j\omega t - jkx) \cdot \mathbf{K}_1$ ，

其中 $M = kF \frac{2\pi a}{T \sinh(kd)}$ ， $N = \cos I \cos \theta$ ， $R = \sin I$ ， $\mathbf{K}_1 = \{ [-jN \cosh k(z+d) - R \sinh k(z+d)] \mathbf{i} + [N \sinh k(z+d) - jR \cosh k(z+d)] \mathbf{k} \}$ 。由于 \mathbf{u} 是时间 t 和坐标 x 的谐波函数，因此经过计算得到的磁场信号也应该是关于 t 和 x 的谐波形式，有

$$\mathbf{H} = \mathbf{h} \cdot \exp(i\omega t - jkx) \quad (11)$$

其中， \mathbf{h} 是关于 z 的函数。考虑到 $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$ ，即 $\mathbf{h} = h_x \mathbf{i} + h_y \mathbf{j} + h_z \mathbf{k}$ 满足 $\frac{dh_z}{dz} = jk h_x$ ， $h_y = 0$ ，令 $\gamma = \sigma \omega$ ，则有

$$\frac{d^2 \mathbf{h}}{dt^2} = \begin{cases} (k^2 + j\omega\gamma) \mathbf{h} - \sigma MK_1, & z < 0 \\ k^2 \mathbf{h}, & z > 0 \end{cases} \quad (12)$$

当 $z \rightarrow \pm\infty$ 时, $h_z = 0$ 。磁场垂直分量和水平分量在空气-海水分界处是连续的, 即

$$\left. \begin{aligned} h_{z,z<0}|_{z=0} &= h_{z,z>0}|_{z=0} \\ h_{x,z<0}|_{z=0} &= h_{x,z>0}|_{z=0} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(12)可以解得

$$\left. \begin{aligned} h_z &= \begin{cases} P \exp(z \cdot \sqrt{k^2 + j\mu\gamma}) - \frac{\sigma M(jN + R)}{2\mu\gamma} \\ \cdot e^{kd} \cdot e^{kz}, & z < 0 \\ Q e^{-kz}, & z > 0 \end{cases} \\ h_x &= \begin{cases} \frac{1}{jk} \left[P \sqrt{k^2 + j\mu\gamma} \cdot \exp(z \cdot \sqrt{k^2 + j\mu\gamma}) \right. \\ \left. - \frac{\sigma Mk(jN + R)}{2\mu\gamma} \cdot e^{kd} \cdot e^{kz} \right], & z < 0 \\ jQ e^{-kz}, & z > 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

其中,

$$P = \frac{\sigma Mk(jN + R) e^{kd}}{\mu\gamma(k + \sqrt{k^2 + j\mu\gamma})}$$

$$Q = \frac{\sigma Mk(jN + R) e^{kd}}{\mu\gamma(k + \sqrt{k^2 + j\mu\gamma})} - \frac{\sigma M(jN + R) e^{kd}}{2\mu\gamma}$$

将式(14)代入式(11), 即可得到海浪感应磁场 \mathbf{H} 的通用理论公式。

当海水深度 d 与波长相比足够大时, 满足 $d/T > 0.5$ 或 $d/gT^2 > 0.0792$, 此时海底不再影响海浪, 波浪速度势函数式(8)可以简化为 $\phi = \frac{ga}{\omega} \cdot e^{kz} \cdot \sin(kx - \omega t)$, 代入 $\mathbf{u} = \nabla\phi$, 得到海水运动的速度分量为 $\mathbf{u} = u_x \mathbf{i} + u_z \mathbf{k} = a\omega e^{kz} \cos(kx - \omega t) \mathbf{i} + a\omega e^{kz} \sin(kx - \omega t) \mathbf{k}$, 依据以上海浪磁场计算方法, 同样可推导出无限深海条件下:

$$\left. \begin{aligned} h_z &= \begin{cases} -\frac{2kA}{\mu k + \mu\sqrt{k^2 + j\mu\gamma}} \\ \cdot \exp(z \cdot \sqrt{k^2 + j\mu\gamma}) + \frac{A}{\mu} e^{kz}, & z < 0 \\ \frac{A\sqrt{k^2 + j\mu\gamma} - Ak}{\mu\sqrt{k^2 + j\mu\gamma} + \mu k} e^{-kz}, & z > 0 \end{cases} \\ h_x &= \begin{cases} \frac{2jA\sqrt{k^2 + j\mu\gamma}}{\mu k + \mu\sqrt{k^2 + j\mu\gamma}} \exp(z \cdot \sqrt{k^2 + j\mu\gamma}) \\ -\frac{Aj}{\mu} e^{kz}, & z < 0 \\ \frac{Aj\sqrt{k^2 + j\mu\gamma} - Akj}{\mu\sqrt{k^2 + j\mu\gamma} + \mu k} e^{-kz}, & z > 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

其中, $A = akF(\sin I + i \cos I \cos \theta)$ 。将式(15)中 h_x, h_z 代入式(11)即可得到无限深海条件下的海浪磁场模型。

经过实验观测发现, 现实中的海浪并不是标准的正弦波形式, 但可以用不同频率正弦波的叠加来进行近似。假设海浪各个频率之间彼此不相关, 可以得到海浪磁场表达式为

$$\mathbf{H} = \sum_{i=0}^m \mathbf{h}_i \cdot \exp(i\omega_i t - jkx) \quad (16)$$

因此通过式(11)、式(14)、式(15)、式(16)可以得到通用条件以及无限水深条件下的海浪磁场噪声的时域和频域估算值, 为谱减法去噪提供必要的支持。

2.4 小波去噪

频谱相减法中傅里叶变换采用的是固定窗函数, 时频分辨率不变, 信号的细节特征相对模糊。而小波变换通过伸缩平移运算, 将信号在多个尺度上进行子波分解, 实现高频处时间细分, 低频处频率细分, 所得各尺度子波变换系数代表原信号在不同分辨率上的信息。其处理的实质在于减小甚至完全剔除由噪声产生的系数, 同时最大限度地保留真实信号的系数, 最后由经过处理的小波系数重构原信号, 得到真实信号的最优估计。由于信号和噪声在不同尺度上存在特性差异, 许多文献利用了这种特性进行去噪处理, 并取得了良好的效果。

设信号为 $x(t)$, 则离散小波变换(Discrete Wavelet Transform, DWT)定义为

$$W_{\psi,x}(j, k) = |a|^{-\frac{j}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi(a^{-j}t - kb_0) dt \quad (17)$$

其中, $\psi(t) \in L^2(R)$ 为基小波函数, a 和 b 分别为尺度参数和平移参数。其重构公式为

$$x(t) = C \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} C_{j,k} \psi_{j,k} \quad (18)$$

小波分解与重构的原理框图如图4所示。从中可以看出, 分解具有如下关系: $S = cA2 + cD2 + cD1$, 其中 $cA2$ 可以继续分解, 最终得到一个在频率上高度逼近其所在空间的正交小波基。这些频率分辨率不同的正交小波基相当于带宽各异的带通滤波器。其分解公式可以记为

$$\left. \begin{aligned} c_{j+1} &= H_0 c_j \\ d_{j+1} &= H_1 c_j \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

其中, d_j 为细节系数, c_j 为尺度系数。当 j 取不同值即对应不同的尺度, 就实现了对信号的多尺度分

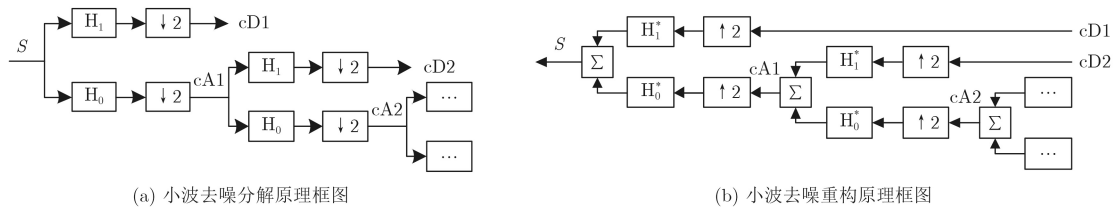


图 4 小波去噪分解与重构原理框图

解。若从实现算法的过程来看，MALLAT分解算法主要是设计滤波器 H_0 和 H_1 。低通滤波器 H_0 的作用是实现信号的逼近，高通滤波器 H_1 的作用是提取信号的细节信息。当对信号进行重构时，有

$$c_j = H_0^* c_{j+1} + H_1^* d_{j+1} \quad (20)$$

其中，滤波器 H_0^* 和 H_1^* 分别为 H_0 和 H_1 的逆序。

通过以上分析，本文算法步骤如图5所示。

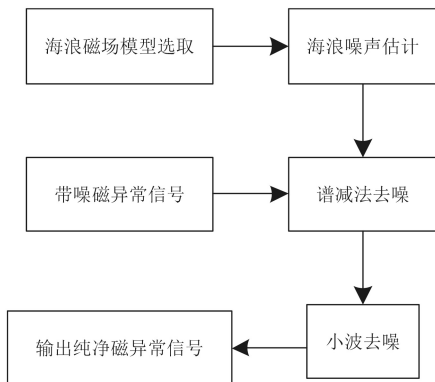


图 5 海洋磁异常检测噪声抑制算法原理框图

3 实验验证与分析

为了验证上述算法的有效性，本文拟采用2015年8月21日08:00我国南海某海域的海洋磁异常观测信号，观测时长为1 h。实验中所用的3分量海底磁测仪噪声水平约为 $10 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}@1 \text{ Hz}$ ，采样频率为500 Hz。图6展示实验地点的海面浪高概况。

因本次实验中磁测仪水平方向未采用角度计进行方向校正，因此选用垂直方向(z 轴)数据进行分析。根据式(2)可以得到纯净的 z 方向磁异常信号，

令 c_1, c_2 为0，磁异常目标运动速度为0.1 m/s，磁距为(10000000, 0, 0)，在 $t = 0$ 时目标位于(-1000, 100, 200)的位置，选取时段为1 h，目标产生的磁异常信号如图7所示。

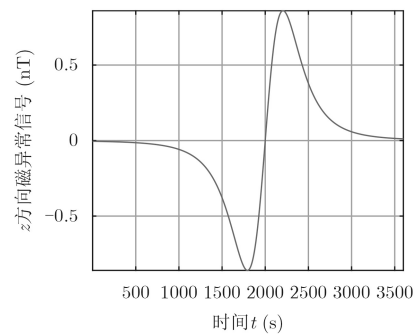


图 7 磁偶极子产生的 z 方向磁场信号

图8分别展示了在南海区域观测到的带噪磁异常信号的时域和频域信息，从图中并未能观测到明显的磁异常信号。在频谱中可以看到海浪磁场的中心频率 $f=0.06886 \text{ Hz}$ ，频带宽度为0.04~0.1 Hz。地磁场则存在于观测频带中的较低频带内，未见明显波峰。磁异常信号与环境噪声的信噪比约为-10 dB。

表1中列出了依据实验观测数据与WW3模型得到的海浪各项参数信息。由于实测数据的海浪频带宽度为0.04~0.1 Hz(图8(b))，表中的周期和波长依此信息计算获得。结合实验过程中设备的GPS信息，通过图6中不同经纬度处的海浪高度图确定了浪高 H 的范围。

地磁场各参数经查询确定为 $F = 43333.7 \text{ nT}$ ， $\theta = -1^\circ 27' 6''$ ， $I = 23^\circ 47' 7''$ ，结合实验进行过程中天气、海面状况，分别利用通用海浪磁场模型和无限深水条件下海浪磁场模型得到海浪磁场的时域及频域估算结果如图9所示。

由于此次实验数据采样率为500 Hz，选取小波分解层数 $J = 10$ ，分别利用通用模型及无限水深模型经过谱减法及小波去噪后的实验结果如图10所示。

由以上实验处理结果可以看出，谱减法主要用于去除海浪磁场噪声，小波算法可以滤除大部分的地磁噪声及其他干扰，相当于一个性能良好的低通滤波器，整体上相比于谱减法具有更好的去噪效

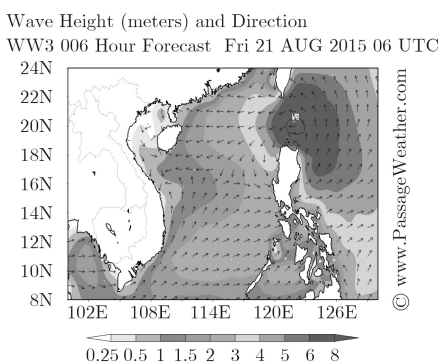


图 6 实验地点以及海面浪高概况

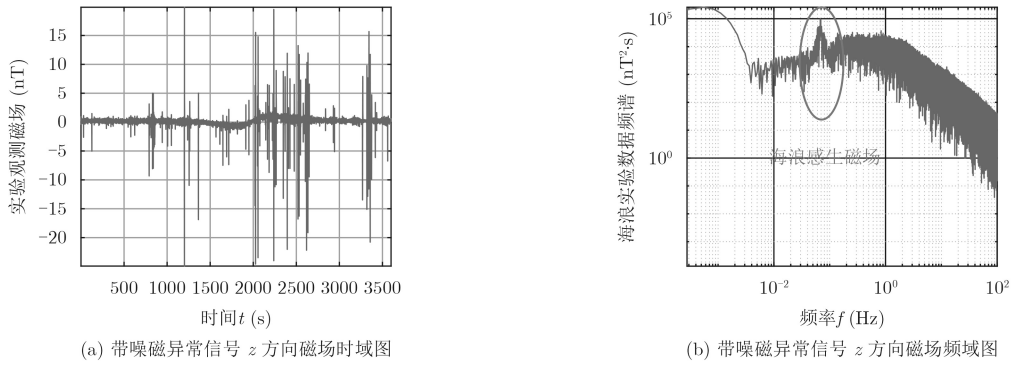


图8 带噪磁异常信号z方向分量的时域及频域显示

表1 海浪基本参数信息

精确传感器测量时间	WW3海浪时间	波长($\times 10^8$ m)	周期(s)	有效波高(m)
2015-8-21 08:00-09:00	08-21 006/06UTC	30~75	10~25	0.5~1.0

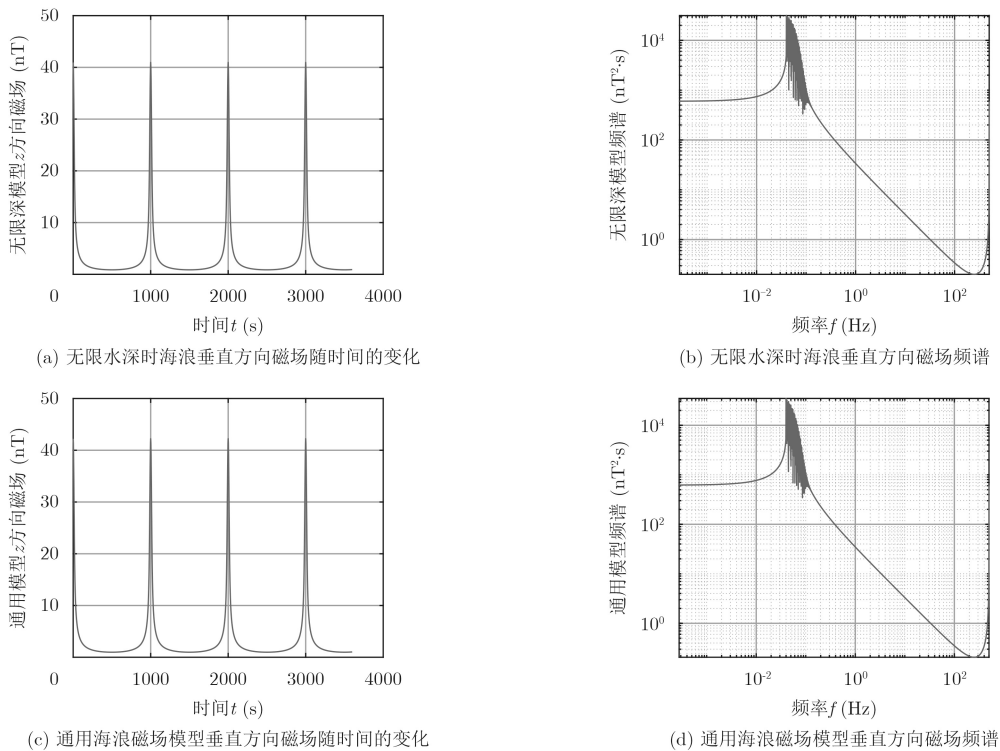


图9 不同海浪磁场模型的时域及频域估算结果

果。通用模型估算得到的海浪磁场噪声比无限水深模型的估算结果偏大，这是由于在模型计算过程中无限水深模型对中间参数做了近似，因此在信噪比的提升方面，采用通用模型的算法信噪比可由-10 dB提升至1 dB，而利用无限水深海浪磁场模型的算法信噪比可提升至0.8 dB，经过谱减法和小波去噪后都能够较大幅度地改善时域波形，在频段0.04~0.10 Hz范围内海浪分布明显减少，证明本文的算法可以有效地抑制海浪和地磁噪声。相比于采用参考测量点信号进行谱减法去噪，本文方法不受限于

参考点的选取，不会引入参考点带来的外部噪声，再经过小波去噪进一步滤除残余海浪噪声和地磁场信号后，可以明显突出磁异常信号。相比于其他噪声抑制算法如自适应滤波以及远参考等，本文方法计算复杂度低，滤波效果突出，可以对数据进行实时处理。但由于谱减法本身存在误差，如对海浪噪声谱的估计不准，式(6)对谱减中的负数部分进行了非线性处理等。此时可以考虑对谱减的负值设置一个下限，而不是将其设为0，后续工作将对谱减法进行相应的改进。

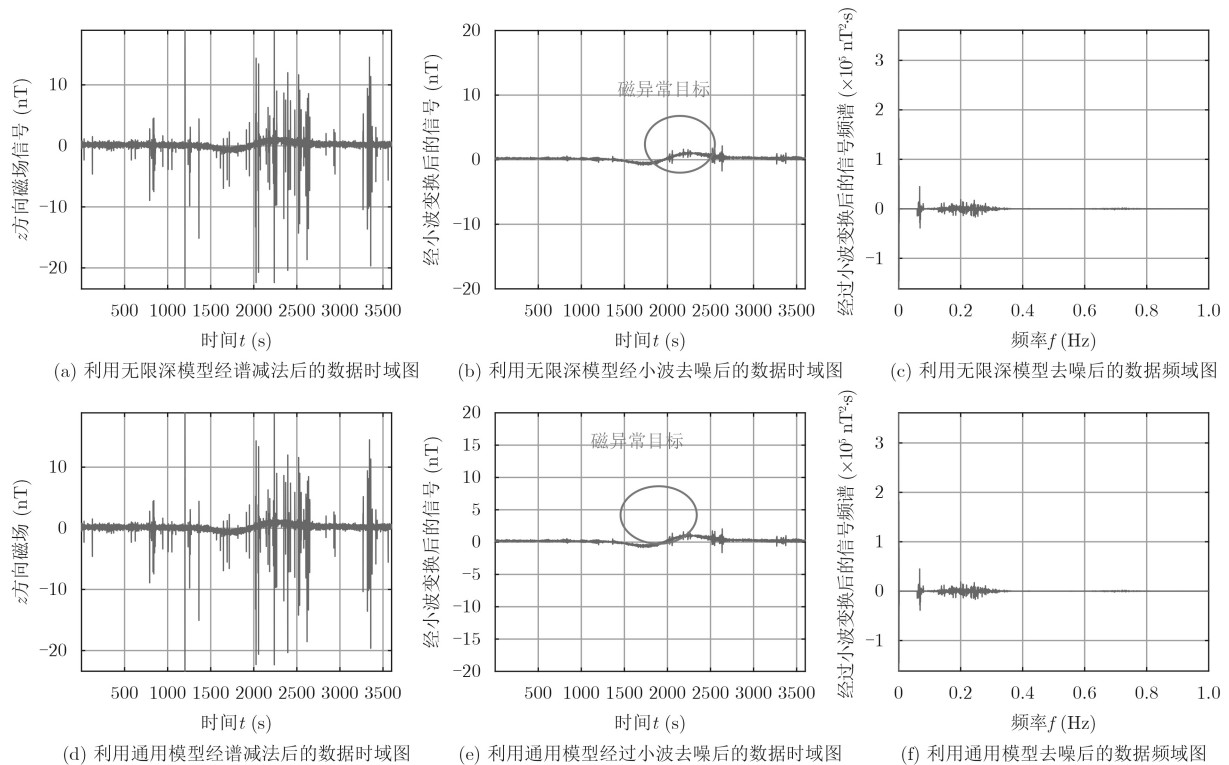


图 10 利用不同海浪磁场模型经过谱减法及小波分析得到的磁异常信号检测结果的时域和频域图

4 结束语

研究各种海洋磁测噪声机理及抑制方法对于提高海洋磁异常检测精度具有重要的意义。本文提出了一种海洋磁异常噪声抑制算法，利用通用型和无限水深条件下的海浪磁场模型分别对海浪感生磁场进行了估算，将估算结果应用到磁异常信号检测噪声抑制中，通过谱减法和去噪结合的方法滤除了磁异常信号中的海浪和地磁场噪声，并利用我国南海某海域的海洋磁场观测数据对该模型和算法的有效性进行了验证。结果表明，在磁场传感器上方通过磁异常目标时，经过本文处理方法可以清楚地观测到目标产生的磁异常信号，信噪比可提升近 11 dB。该方法计算复杂度低，实时性强且易于实现，可为海洋磁异常检测噪声抑制提供有效参考。

参考文献

- [1] 任来平, 张启国, 马刚. 水下铁磁体的海面磁场计算模型研究[J]. 海洋测绘, 2004, 24(6): 16–19. doi: 10.3969/j.issn.1671-3044.2004.06.005.
REN Laiping, ZHANG Qiguo, and MA Gang. Research for calculating model of underwater ferromagnet magnetic field on sea surface[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2004, 24(6): 16–19. doi: 10.3969/j.issn.1671-3044.2004.06.005.
- [2] NAIN H, ISA M C, MUHAMMAD M M, et al. Management of naval vessel's electromagnetic signatures: A review of sources and countermeasures[J]. *Defence S & T Technical Bulletin*, 2013, 6(2): 93–110.
- [3] TORRANCE B. Low signature impressed current cathodic protection-new development-future concepts[J]. *Journal of Computing Science and Engineering*, 2006, 9(17): 511–526.
- [4] WATERMANN J and LAM J. Distributions of magnetic field variations, differences and residuals[R]. DTIC Document, 1999.
- [5] SHEINKER A, GINZBURG B, SALOMONSKI N, et al. Magnetic anomaly detection using high-order crossing method[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(4): 1095–1103. doi: 10.1109/TGRS.2011.2164086.
- [6] FRUMKIS L, GINZBURG B, SALOMONSKI N, et al. Optimization of scalar magnetic gradiometer signal processing[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 121(1): 88–94. doi: 10.1016/j.sna.2005.01.019.
- [7] SHEINKER A, FRUMKIS L, GINZBURG B, et al. Magnetic anomaly detection using a three-axis magnetometer[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2009, 45(1): 160–167. doi: 10.1109/TMAG.2008.2006635.
- [8] SHEINKER A, GINZBURG B, SALOMONSKI N, et al. Localization in 2D using beacons of low frequency magnetic field[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(2): 1020–1030. doi: 10.1109/JSTARS.2012.2213240.
- [9] OTNES R. Static magnetic dipole detection using vector

- linear prediction, Anderson functions, and block-based adaptive processing[C]. Europe Oceans Conference, Aberdeen, Scotland, 2007: 1–6. doi: [10.1109/OCEANSE.2007.4302288](https://doi.org/10.1109/OCEANSE.2007.4302288).
- [10] LUCAS C and OTNES R. Noise removal using multi-channel coherence[R]. DTIC Document, 2010.
- [11] 刘敦歌. 目标磁异常/轴频信号处理方法研究[D]. [博士学位], 中国科学院大学, 2016: 9–12.
LIU Dunge. Research on processing of targets' magnetic anomaly/shaft frequency signatures[D]. [Ph.D. dissertation], The University of Chinese Academy of Sciences, 2016: 9–12.
- [12] FAGGIONI O, SOLDANI M, GABELLONE A, *et al.* Undersea harbour defence: A new choice in magnetic networks[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2010, 72(1): 46–56. doi: [10.1016/j.jappgeo.2010.07.001](https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2010.07.001).
- [13] WAHLSTRÖM N. Localization using magnetometers and light sensors[D]. [Master dissertation], Linköping University, 2013: 23–25.
- [14] 费春娇, 吴佩霖, 张群英, 等. 一种改进型的基于Stokes一阶波的海浪磁场模型[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 2007–2013. doi: [10.11999/JEIT161123](https://doi.org/10.11999/JEIT161123).
FEI Chunjiao, WU Peiling, ZHANG Qunying, *et al.* Improved model of ocean wave induced magnetic field based on the first order Stokes Equations[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 2007–2013. doi: [10.11999/JEIT161123](https://doi.org/10.11999/JEIT161123).
- [15] BR Webworks, Status[OL]. <http://passageweather.com/>, 2006-2017.
- 费春娇: 女, 1989年生, 博士生, 研究方向为海洋环境磁场模型的建立以及噪声抑制方法.
张群英: 女, 1972年生, 研究员, 主要研究微波遥感技术和信号处理技术.
吴佩霖: 男, 1988年生, 博士生, 研究方向为航空磁力仪运动平台校正及参数补偿方法.
方广有: 男, 1963年生, 研究员, 主要研究超宽带电磁场理论及工程应用、超宽带雷达成像技术、微波成像新方法和新技术.
朱万华: 男, 1982年生, 副研究员, 主要研究磁异常信号检测、磁场传感器关键技术.
许 鑫: 男, 1986年生, 助理研究员, 主要研究磁异常信号检测、海洋磁测信号处理与噪声抑制方法.