

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.551>



基于 Sage-Husa 算法的拖曳式 Overhauser 海洋磁场传感器海浪磁场噪声实时抑制方法

葛 健^{1,3}, 董浩斌^{1,3*}, 刘 欢², 罗 望¹, 柏明明¹, 邱香域¹, 袁志文³,
刘咏华³, 朱 俊³, 张海洋³

1. 中国地质大学自动化学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

3. 近地面探测技术重点实验室, 江苏无锡 214035

摘要:利用 Weaver 海浪模型, 对拖曳式 Overhauser 海洋磁场传感器海浪磁噪声与深度、波幅等之间的关系进行了理论分析, 证明了在极端海况条件下对海浪磁噪声进行抑制的必要性。为提高海洋磁测灵敏度, 提出了一种基于改进的 Sage-Husa 自适应 Kalman 算法的海浪磁场噪声抑制方法。仿真结果表明, 该方法能在不需要先验的噪声统计或实时参考噪声的情况下, 实现磁场噪声协方差的快速收敛; 且与常规的 Sage-Husa 算法相比, 改进后的 Sage-Husa 算法降低了对初始参数的依赖性。另外, 设计了一种拖曳式 Overhauser 海洋磁场传感器测试仪来测试上述算法。对比结果表明该方法不仅实现了磁场噪声统计参数的自适应估计, 而且比经典 Kalman 滤波具有更好的滤波效果; 此外, 海浪磁噪声的功率谱密度由 $50 \text{ pT/Hz}^{1/2} @ 1\text{Hz}$ 下降到 $6 \text{ pT/Hz}^{1/2} @ 1\text{Hz}$ 。

关键词: Sage-Husa 算法; Kalman 滤波器; 拖曳式磁测; Overhauser 海洋磁场传感器; 磁场噪声实时抑制; 地球物理。

中图分类号: TP216

文章编号: 1000-2383(2018)10-3792-07

收稿日期: 2018-01-11

Real-time Reduction of Magnetic Noise Associated with Ocean Waves via Sage-Husa Algorithm for Towed Overhauser Marine Geomagnetic Sensor

Ge Jian^{1,3}, Dong Haobin^{1,3*}, Liu Huan², Luo Wang¹, Bai Mingming¹, Qiu Xiangyu¹, Yuan Zhiwen³,
Liu Yonghua³, Zhu Jun³, Zhang Haiyang³

1. School of Automation, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Science and Technology on Near-Surface Detection Laboratory, Wuxi 214035, China

Abstract: Based on Weaver's model, we analyze the magnetic noise variations of the towed Overhauser marine magnetic sensor associated with the different ocean depths, wave periods and amplitudes in theory, proving the necessity of suppressing the magnetic noise in the extreme ocean conditions. In this paper, we propose a novel real-time reduction method of the magnetic noise via an improved Sage-Husa adaptive Kalman filter (KF) to improve the sensor sensitivity. The simulation results show that the proposed method could achieve the fast convergence of the covariance of magnetic noise without the priori noise statis-

基金项目: 青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金项目(No.QNLM2016ORP0201); 国家自然科学基金项目(Nos.41474158, 41504137); 国家重大科学仪器设备开发专项(No.2014YQ100817); 中国博士后科学基金项目(No.2016M592410); 科技部中小企业发展专项资金项目(No.14C26214202344); 近地面探测技术重点实验室开放基金项目(Nos.TCGZ2015A008, TCGZ2016A005)。

作者简介: 葛健(1986-), 男, 副教授, 主要从事地球物理探测技术及仪器研究。ORCID:0000-0001-7211-7337.E-mail: gejian@cug.edu.cn

* 通信作者: 董浩斌, ORCID:0000-0002-6475-3648.E-mail: donghb@cug.edu.cn

引用格式: 葛健, 董浩斌, 刘欢, 等, 2018. 基于 Sage-Husa 算法的拖曳式 Overhauser 海洋磁场传感器海浪磁场噪声实时抑制方法. 地球科学, 43(10):3792-3798.

tics or real-time reference noise. Furthermore, the dependency on the initial parameters is reduced compared with the standard Sage-Husa algorithm. In addition, we implement a towed Overhauser marine magnetometer to test the proposed method. Overall, the comparison experiments show that the proposed method not only realizes the adaptive estimation of the magnetic noise statistics, but also has better suppression effect than the standard KF. The power spectral density of the magnetic noise is reduced to $6 \text{ pT/Hz}^{1/2}@1\text{Hz}$ from $50 \text{ pT/Hz}^{1/2}@1\text{Hz}$ after flitting.

Key words: Sage-Husa algorithm; Kalman filter; towed magnetic survey; overhauser marine magnetic sensor; real-time reduction of magnetic noise; geophysics.

0 引言

海洋磁力仪是实现海洋地磁场高精度测量的主要科学仪器,在海洋资源开发、海洋军事探测、海洋工程勘察等领域中得到了广泛运用.在拖曳式磁测中,磁力仪由船舶拖曳进行移动测量,使用较为灵活,而且不受到载体磁场的影响,是海洋地磁测量的主要方式之一(Dhanak *et al.*, 2015; Tumanski, 2016).Overhauser 传感器具有测量精度高、无测量死区(当部分地磁传感器的轴线与地磁场之间的夹角处于一定范围内会造成传感器无法正常感应地磁场,将这一夹角范围定义为测量死区)和低航向误差等优点(Tumanski, 2016),在海洋磁测中得到了广泛运用.

Longuet-Higgins *et al.*(1954)通过理论研究指出海浪等海水运动会切割地磁场,从而感应产生磁场和电场噪声.随后,一些海浪感应磁场理论模型被提出来用于研究这种噪声(Weaver, 1965, 1997; Semkin and Smagin, 2012),如 Weaver 模型被广泛使用.Lilley *et al.*(2004)和 Dostal *et al.*(2012)报道的海浪磁噪声观测结果与理论模型基本一致,实际海浪磁噪声峰值幅度可达到几 nT,从而会干扰 Overhauser 传感器.目前大部分的海浪磁场噪声抑制研究主要集中在航空磁探测领域(邓鹏和林春生, 2009; Lyall *et al.*, 2014; 熊雄等, 2015).在常规的水中磁探(拖曳式、海底基站式)中,通常可以选择在海况较好时测量,并通过事后数据处理的方式来降低磁场噪声的影响,因此对水中磁探中的噪声抑制研究的较少.但当进行特殊的水中磁探时,如海洋工程勘察(沉船、飞机残骸探测等)和军事探测(反潜、UXO 探测等),要求在极端海况条件下对目标的微弱磁异常进行探测,因此磁噪声的干扰不可避免.特别是近年来随着制造工艺的提升和无磁性材料的大量使用,一些水下目标在水面处的磁异常越来越小(仅几个 nT),这一类噪声所带来的问题越来越多.此外,上述的特殊探测通常要求磁力仪具备对磁数

据进行实时处理和校正的能力,以便在现场就能对探测结果进行初步判定,因此在特殊海洋磁探测中实现海浪磁场噪声的实时抑制显得非常有必要(Dhanak *et al.*, 2013).

Hughes and Tomic (2010)和还迎春等(2009)通过 PM 海浪谱仿真认为当探测远程目标($>100 \text{ m}$)和拖曳速度较慢(小于 20 节)时,海浪磁噪声与目标的频带存在差异,因此提出用 Butterworth 低通和带通滤波器进行磁噪声的消除.Quinquis (1998)、王志刚 (2011)和朱兴乐等(2014)提出利用小波变换来消除海浪磁噪声,但该方法同样依赖噪声与目标的频带差异,且阈值的选择一般根据经验确定.邓鹏和林春生 (2009)、熊雄等(2015)提出利用 LMS 自适应滤波算法来对航空磁探中的海浪磁噪声进行抑制,但该方法要求进行海浪磁噪声的事先测量或海浪谱的实时测量以补偿噪声的影响.Lyall *et al.*(2014)和 Liu *et al.* (2014)提出利用自适应相干噪声抑制方法对地面磁测中的背景磁噪声进行抑制,但需要一个参考磁力仪用于噪声的实时测量.

实际的海浪是呈随机分布的(Smit *et al.*, 2015),使得海浪磁噪声具有时变性和随机性,从而海浪磁噪声和目标磁异常的频带并不能绝对地分开,因此频域滤波方法的抑制效果有限.另外,上述的自适应滤波算法虽然比频域滤波算法有效,但根据海浪谱或者海浪磁噪声独立测量所获取的噪声序列及其统计特性可能是未知且时变的,先验的数据也往往由于海况的变化而失去意义,并可导致滤波效果失去最优性或者发散.Kalman 滤波是一种递推的无偏线性最小方差估计(Naets *et al.*, 2015),根据前一个系统估计值和当前观测值来估计当前信号值,能够成为一种潜在的抑制海浪磁噪声的有效手段.经典 Kalman 和前述的自适应滤波算法一样,需要噪声先验信息.为降低对噪声先验信息的依赖性,本文提出利用 Sage-Husa 自适应 Kalman 算法来进行拖曳式 Overhauser 海洋磁场传感器海浪磁场噪声抑制.

1 海浪磁噪声特征

Weaver 模型是目前在海浪感应磁场研究中使用较广泛的模型,该模型只考虑海洋运动的主要因素,且同时可计算海平面上方和下方的磁场(Weaver, 1965),其示意图如图 1 所示。

假设海浪是无数个简谐波矢量和,图 1 是单个的简谐波, x 轴正方向沿海浪传播的方向; y 轴垂直于 x 轴; z 轴正方向指向海底,当海面平静时,取 $z=0$; θ 为海浪运动方向与地磁北极的夹角; I 为地磁倾角(地磁总场 F 与地磁北极的夹角)。当 $z>0$ 时,水中的海浪磁噪声的分量分别为(Weaver, 1965):

$$B_x = A \left[\frac{2\sqrt{1+i\beta}}{1+\sqrt{1+i\beta}} e^{-mz\sqrt{1+i\beta}} - e^{-mz} \right], \quad (1)$$

$$B_y = 0, \quad (2)$$

$$B_z = iA \left(\frac{2}{1+\sqrt{1+i\beta}} e^{-mz\sqrt{1+i\beta}} - e^{-mz} \right), \quad (3)$$

式中, $A = amF(\sin I + i\cos I \cos \theta)$, $\beta = \mu\sigma g^2/\omega^3$, $m = \omega^2/g$ 为角波数, a 为海浪振幅, ω 为海浪角频率(海浪周期 $T = 2\pi/\omega$), g 为重力加速度, μ 为海水磁导率, σ 为海水电导率。

以中国东海某海域为例,地磁总场 $F = 47\,300$ nT,海浪周期范围是 2~15 s,海浪幅度范围是 0~20 m, $I = 45^\circ$, $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, $\sigma = 4.2$ S/m, $\theta = 0^\circ$ 。将 30 种不同频率、不同幅度的海浪波叠加之后,可以计算得到当地的海浪磁场噪声总场 B (由分量计算得到)。噪声总场 B 与海浪振幅 a 、深度 z 、角频率 ω 之间的关系如图 2 所示。

图 2 和图 3 表明海浪磁噪声会随着深度、波幅、波周期的增加而加剧,而随着深度的增加减弱;当海

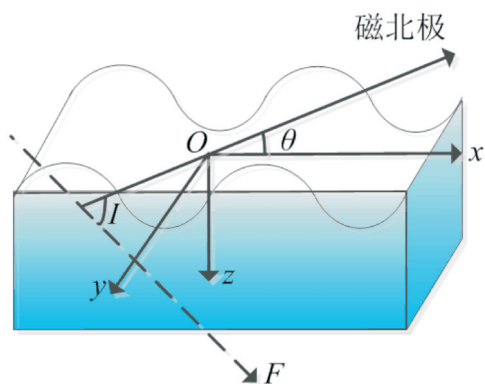


图 1 Weaver 海浪感应磁场模型

Fig.1 Weaver model for the induced magnetic field from ocean waves

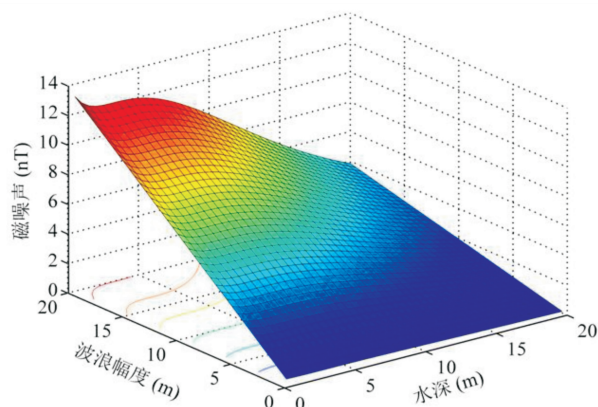


图 2 $\omega = 0.4\pi$ rad/s 时的海浪磁场噪声

Fig.2 Magnetic noise associated with ocean waves ($\omega = 0.4\pi$ rad/s)

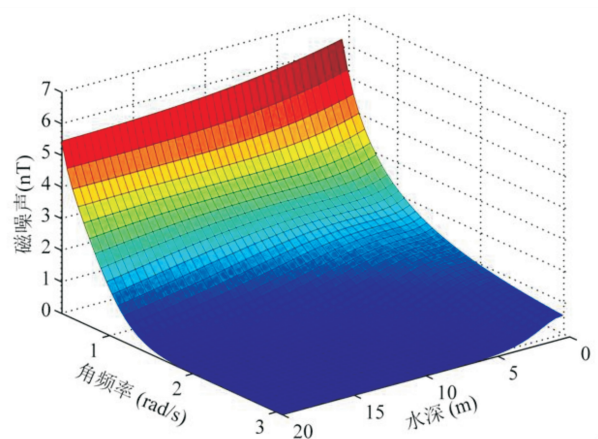


图 3 $a = 3$ m 时的海浪磁场噪声

Fig.3 Magnetic noise associated with ocean waves ($a = 3$ m)

况较好和常规的拖曳深度(小于 10 m)时,磁噪声会下降到 1 nT 以内,对磁异常探测影响较小,但是当海况较差时(波浪幅度较大或周期较长),磁噪声可达到十几 nT,即使通过增加拖曳电缆长度和降低拖曳速度来将拖曳深度下降到 20 m,磁噪声也可达到几个 nT。显然,这样的强噪声水平会对高灵敏度的 Overhauser 传感器(可低至 $10\text{pT}/\text{Hz}^{1/2}$ @ 1Hz; Ge *et al.*, 2016)的测量造成影响;特别是当目标的磁异常较微弱时,噪声可能会将其淹没,从而降低对磁性目标探测性能。因此,与 Lilley *et al.* (2004) 和 Dostal *et al.* (2012) 的结论类似,当高精度的海洋地磁传感器在中国东海等海域使用时,对海浪磁场噪声进行抑制也是非常必要的。

2 海浪磁噪声的抑制

根据 Kalman 滤波的原理可知, t_k 时刻的地磁场估计值 X_k 受系统噪声 W_{k-1} 驱动, 此时的 Kalman 状态方程和量测方程分别为 (Mathieu *et al.*, 2013):

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + W_{k-1} + U_k, \quad (4)$$

$$Z_k = H_k X_k + V_k, \quad (5)$$

式中, $\Phi_{k,k-1}$ 为 t_{k-1} 时刻至 t_k 时刻的转移矩阵; U_k 为控制量, 由于在实际测量中仅从传感器读取地磁总场数据, 因此 U_k 为零; Z_k 为 t 时刻的量测值; H_k 为量测数据; V_k 为量测噪声。

假设系统噪声和量测噪声是互不相关的零均值高斯白噪声, 并满足:

$$\begin{cases} E[W_k] = q_k, E[W_k W_n^T] = \delta_{kn} Q_k, \\ E[V_k] = r_k, E[V_k V_n^T] = \delta_{kn} R_k, \end{cases} \quad (6)$$

$$\delta_{kn} = \begin{cases} 1, k = n \\ 0, k \neq n \end{cases}$$

式中, Q_k 为系统噪声的协方差阵; R_k 为量测噪声的协方差阵; δ_{kn} 为狄拉克 δ 函数。

在给定了初始条件 X_0 和 P_0 以及磁噪声统计参数 Q, R 后, 根据经典 Kalman 滤波方程 (Abrecht *et al.*, 2015), 按照下面的 5 个方程进行递推计算, 即可估计 t_k 时刻的地磁场值 $\hat{X}$:

$$\hat{X}_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1}, \quad (7)$$

$$P_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + Q, \quad (8)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R)^{-1}, \quad (9)$$

$$\hat{X} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k|k-1}), \quad (10)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}, \quad (11)$$

式中, $\hat{X}_{k|k-1}$ 是一步状态估计; $P_{k|k-1}$ 为估计误差的协方差阵; K_k 为滤波增益。虽然经典 Kalman 方程不需要进行海浪磁噪声的事先测量或海浪谱的实时测量, 但是依然需要预先确定磁噪声统计参数 Q 和 R 。当在极端海况中进行海洋地磁场测量时, 海况的随机性和时变性会导致噪声统计参数随时发生变化, 从而无法确保磁场估计的最优性, 甚至可能导致滤波器的发散。

针对以这一问题, 本文利用 Sage-Husa 自适应算法 (Sage and Husa, 1969; Gao *et al.*, 2012) 来实现磁噪声协方差阵的自适应估计, 以降低 Kalman 滤波对初始参数的依赖。Sage-Husa 算法能够在递推滤波的同时, 实时递推估计和修正磁场噪声及其协方差阵 Q 和 R , 然后反馈给滤波增益 K 。假设 Q 和 R 是不确定和时变的, 将 Sage-Husa 算法中的时变噪声统计递推估计器与经典 Kalman 滤波方程 (7)~(11) 匹配后可得到带遗忘因子的 Sage-Husa 自适应 Kalman 滤波的递推方程为:

$$\hat{X}_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} + \hat{q}_{k-1}, \quad (12)$$

$$P_{k|k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \hat{Q}_{k-1}, \quad (13)$$

$$v_k = Z_k - H_k \hat{X}_{k|k-1} - \hat{r}_{k-1}, \quad (14)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + \hat{R}_{k-1})^{-1}, \quad (15)$$

$$\hat{X} = \hat{X}_{k|k-1} + K_k v_k, \quad (16)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} (I - K_k H_k)^T + K_k \hat{R}_k K_k^T, \quad (17)$$

$$\hat{q}_k = (1 - d_{k-1}) \hat{q}_{k-1} + d_{k-1} (\hat{X} - \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1}), \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \hat{Q}_k &= (1 - d_{k-1}) \hat{Q}_{k-1} + d_{k-1} (K_k v_k v_k^T K_k^T \\ &\quad + P_k - \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T) \end{aligned} \quad (19)$$

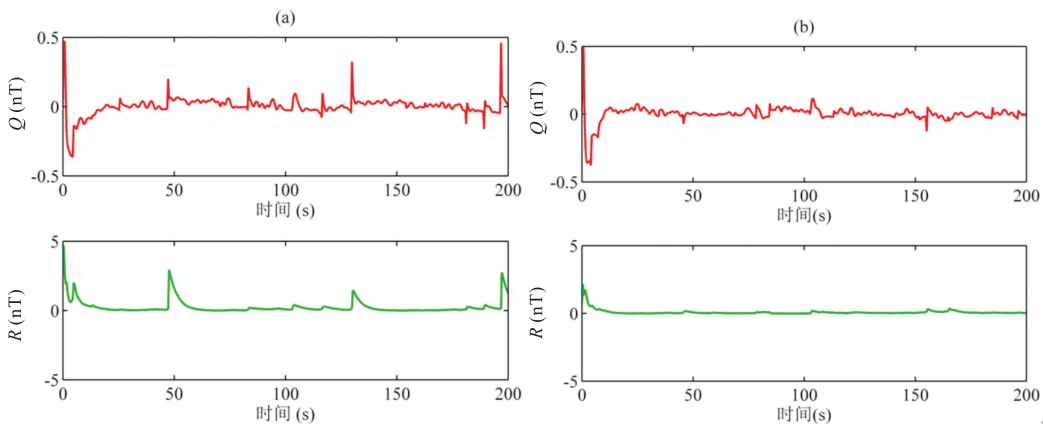


图 4 当 R_0 分别为 0.75 (a) 和 4.75 (b) 时基于 Sage-Husa 算法的 Q 和 R 的估计

Fig.4 Estimations of Q and R using Sage-Husa algorithm with $R_0=0.75$ (a) and $R_0=4.75$ (b)

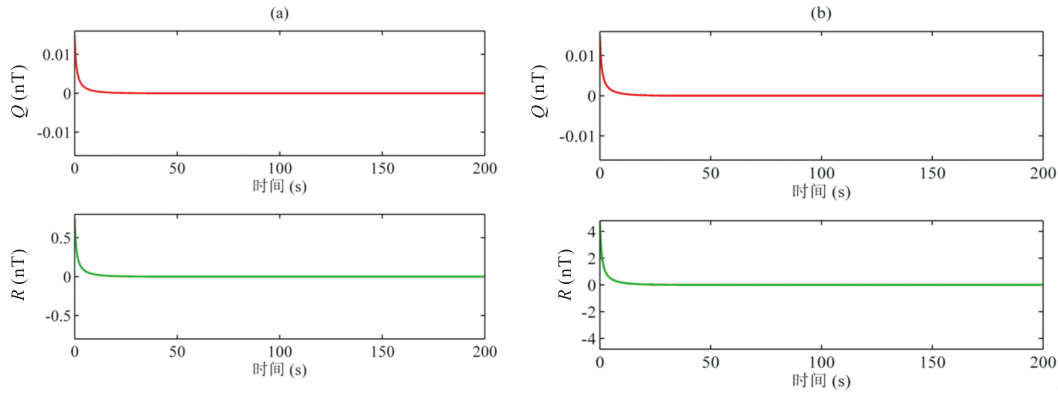


图 5 当 R_0 分别为 0.75 (a) 和 4.75 (b) 时基于改进后的 Sage-Husa 自适应算法的 Q 和 R 的估计

Fig.5 Estimations of Q and R using improved Sage-Husa algorithm with $R_0 = 0.75$ (a) and $R_0 = 4.75$ (b)

$$\hat{r}_k = (1 - d_{k-1})\hat{r}_{k-1} + d_{k-1}(Z_k - H_k\hat{X}_{k|k-1}), \quad (20)$$

$$\hat{R}_k = (1 - d_{k-1})\hat{R}_{k-1} + d_{k-1}(v_k v_k^T - H_k P_{k|k-1} H_k^T), \quad (21)$$

式中, $d_{k-1} = (1 - b)/(1 - b^k)$, b 为遗忘因子(取值范围是 $0.95 < b < 0.995$), v_k 是新息. 以中国东海某海域的磁噪声仿真数据来测试该算法, 设地磁总场 $F = 47\,300$ nT, 海浪周期在 $0.5 \sim 1$ s 内变化, 海浪幅度范围为 1 m, $I = 45^\circ$, $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, $\sigma = 4.2$ s/m, $\theta = 0^\circ$; 当 $b = 0.95$, $P_0 = 1.5$, $Q_0 = 0.015$, $q_0 = 0$, $r_0 = 0$, R_0 分别为 0.75 和 4.75 时, 系统噪声协方差阵 Q 和观测噪声协方差阵 R 的估计如图 4 所示. 可以看到采用 Sage-Husa 自适应 Kalman 滤波算法虽然能够使 Q 和 R 收敛在 0 附近, 但波动量较大, 且当 R_0 变化时对收敛结果影响较大.

由于常规的 Sage-Husa 自适应 Kalman 滤波需要同时对系统噪声和量测噪声的统计特性进行自适应调整, 这不仅导致算法运算量增大, 而且增加了滤波发散的概率. 为提高算法的稳健性, 提出改进的 Sage-Husa 自适应 Kalman 滤波算法: 即适当牺牲一定的滤波精度, 用两种噪声的协方差阵的渐近无偏估计代替其无偏估计. 只要初始的噪声协方差阵正定, 且 $0 < d_k < 1$, 则其在递推过程中能够始终保持正定, 算法的稳健性得到改善. 则式 (17)、(19) 和 (21) 可分别简化为:

$$\hat{R}_k = (1 - d_k)\hat{R}_{k-1}, \quad (22)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k|k-1} (I - K_k H_k)^T, \quad (23)$$

$$\hat{Q}_k = (1 - d_k)\hat{Q}_{k-1}. \quad (24)$$

当采用与图 3 中相同的参数时, 系统噪声方差阵 Q 和观测噪声方差阵 R 的估计如图 5 所示. 对比图 4 和图 5 可发现, 在采用改进后的 Sage-Husa 自

适应算法后, Q 和 R 均实现了快速收敛, 且健壮性不会随着 R_0 的变化而受到影响.

3 实验与分析

为对上述算法进行测试, 设计了如图 6 所示的拖曳式 Overhauser 海洋磁场传感器测试仪器. 该仪器由 Overhauser 传感器(葛健等, 2015)和传感器处理板(射频振荡器和信号放大器、频率计、控制器组成)组成. 传感器输出信号的角频率 ω_p 与地磁场强度 F 之间的关系为(Ge et al., 2016).

$$F = \omega_p / \gamma_p, \quad (25)$$

式中, γ_p 是质子磁旋比常数; ω_p 是传感器输出的自由感应衰减信号的角频率. 根据上式即可得到当前的地磁总场值.

该实验在可产生人工波浪的水槽中进行. 在实验中, 采用两个相同的 Overhauser 传感器对不同的抑制算法进行对比测试, 传感器之间相距 0.5 m 以避免相互之间的干扰. 此外, 在水槽 1 m 深处放置了铁块作为探测目标, 可在水面处产生约为 5 nT 的磁异常.

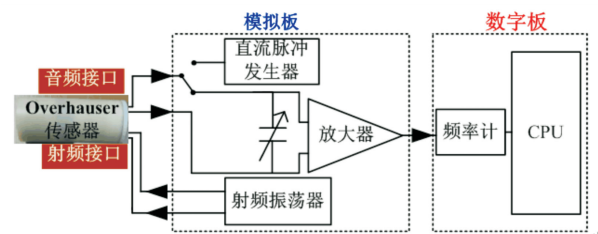


图 6 测试仪器的结构

Fig.6 Block diagram of test instrument

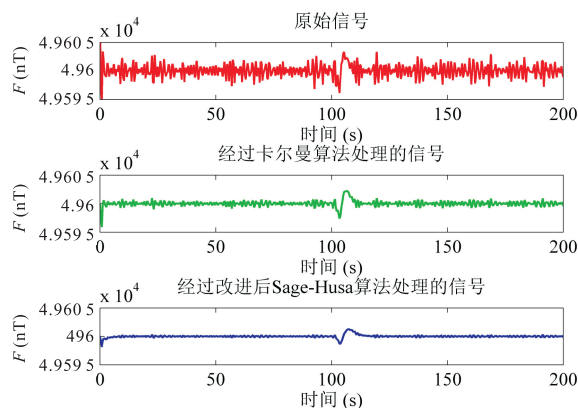


图 7 经典 Kalman 算法和改进后 Sage-Husa 自适应算法的抑制效果

Fig.7 Suppression effect of standard Kalman and improved Sage-Husa algorithm

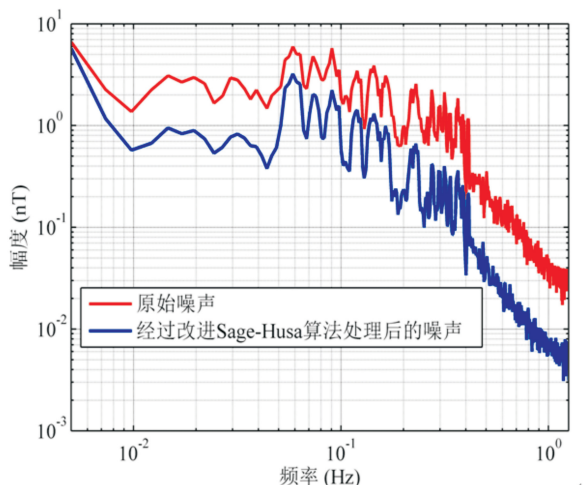


图 8 海浪磁噪声的功率谱密度

Fig.8 Power spectral density of magnetic noise associated with ocean waves

图 7 分别为磁传感器探测到的原始信号、经过经典 Kalman 算法处理的信号和经过改进后的 Sage-Husa 自适应算法处理的信号.对比结果表明,虽然经过人工给定了最优先验参数,经典 Kalman 算法也具有一定的噪声抑制效果,但是改进后的 Sage-Husa 自适应算法不仅实现了噪声统计参数的自适应,而且具有更好的抑制效果.

如图 8 所示,为在没有放置铁块的情况下,经过改进后的 Sage-Husa 自适应算法处理后,海浪磁噪声的功率谱密度由 $50 \text{ pT/Hz}^{1/2} @ 1\text{Hz}$ 下降到 $6 \text{ pT/Hz}^{1/2} @ 1\text{Hz}$,说明传感器的海浪磁噪声得到了有效抑制.

4 结论

为降低极端海况下海浪磁噪声对拖曳式 Overhauser 海洋磁场传感器的影响,本文研究了一种基于改进的 Sage-Husa 自适应 Kalman 算法的噪声抑制方法,并设计了专门的拖曳式 Overhauser 海洋磁场传感器测试仪器来对抑制算法进行测试.经过该算法处理前后的磁场数据表明,该算法具有显著的海浪磁噪声抑制效果,且具备不同海况条件下噪声统计参数的自适应能力;海浪磁噪声的功率谱密度可由 $50 \text{ pT/Hz}^{1/2} @ 1\text{Hz}$ 下降到 $6 \text{ pT/Hz}^{1/2} @ 1\text{Hz}$.

References

- Abrecht, D. G., Schwantes, J. M., Kukkadapu, R. K., et al., 2015. Real-Time Noise Reduction for Mössbauer Spectroscopy through Online Implementation of a Modified Kalman Filter. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 773: 66–71. <https://doi.org/10.1010/j.nima.2014.10.053>
- Deng, P., Lin, C. S., 2009. Implementation of Adaptive Filter on Wave-Generated Magnetic Noise Based on LMS Algorithm. *Electronic Measurement Technology*, 32(12): 58–60 (in Chinese with English abstract).
- Dhanak, M., An, E., Coulson, R., et al., 2015. AUV-Based Characterization of EMF Emissions from Submerged Power Cables. 2015 IEEE OCEANS, Genova. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271719>
- Dhanak, M., An, E., Couson, R., et al., 2013. Magnetic Field Surveys of Coastal Waters Using an AUV-Towed Magnetometer. 2013 IEEE Oceans, San Diego.
- Dostal, J., Martinec, Z., Thomas, M., 2012. The Modelling of the Toroidal Magnetic Field Induced by Tidal Ocean Circulation. *Geophysical Journal International*, 189(2): 782–798. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2012.05407.x>
- Gao, X. D., You, D. Y., Katayama, S., 2012. Seam Tracking Monitoring Based on Adaptive Kalman Filter Embedded Elman Neural Network during High-Power Fiber Laser Welding. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(11): 4315–4325. <https://doi.org/10.1109/tie.2012.2193854>
- Ge, J., Dong, H. B., Liu, H., et al., 2016. Overhauser Geomagnetic Sensor Based on the Dynamic Nuclear Polarization Effect for Magnetic Prospecting. *Sensors*, 16(6): 806.
- Ge, J., Lu, C. D., Dong, H. B., et al., 2015. The Detection Technology of Near-Surface UXO Based on Magnetic Gradient Method and Overhauser Sensor. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 36(5): 38–50 (in Chinese)

- with English abstract).
- Huan, Y. C., Hu, H. B., Fang, S., 2009. Simulation and Removal of Magnetic Field Noise Generated by Ocean Waves. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 29 (11): 61—63 (in Chinese with English abstract).
- Hughes, M., Tomic, M., 2010. Geomagnetic Noise Analysis and Suppression from Next Generation Autonomous Systems 2009 Sea Trials. 2010 MTS/IEEE Oceans Seattle. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2010.5664294>
- Lilley, F. E. M., Hitchman, A. P., Milligan, P. R., et al., 2004. Sea-Surface Observations of the Magnetic Signals of Ocean Swells. *Geophysical Journal International*, 159 (2): 565—572. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2004.02420.x>
- Liu, D. G., Xu, X., Huang, C., et al., 2014. Adaptive Cancellation of Geomagnetic Background Noise for Magnetic Anomaly Detection Using Coherence. *Measurement Science and Technology*, 26 (1): 015008. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/1/015008>
- Longuet-Higgins, M. S., Stern, M. E., Stommel, H. M., 1954. The Electrical Field Induced by Ocean Currents and Waves, with Applications to the Method of Towed Electrodes. Papers in Physical Oceanography and Meteorology XIII, I, Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution. <https://doi.org/10.1575/1912/1064>
- Lyall, R., Li, X., Rowe, J., 2014. Identification and Removal of Ocean Swell Effects in Aeromagnetic Surveys. SEG (Society of Exploration Geophysicists) Annual Meeting.
- Mathieu, J. L., Koch, S., Callaway, D. S., 2013. State Estimation and Control of Electric Loads to Manage Real-Time Energy Imbalance. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28 (1): 430—440. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2012.2204074>
- Naets, F., Cuadrado, J., Desmet, W., 2015. Stable Force Identification in Structural Dynamics Using Kalman Filtering and Dummy-Measurements. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 50—51: 235—248. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2014.05.042>
- Quinquis, A., 1998. Multisensors Detection of Underwater Magnetic Signals: A Wavelet Packets Application. *Traitement du Signal*, 15 (1): 57—66.
- Sage, A. P., Husa, G. W., 1969. Adaptive Filtering with Unknown Prior Statistics. *Joint Automatic Control Conference*, 7: 760—769. <https://doi.org/10.1109/jacc.1969.4169325>
- Semkin, S. V., Smagin, V. P., 2012. The Effect of Self-Induction on Magnetic Field Generated by Sea Surface Waves. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 48 (2): 207—213. <https://doi.org/10.1134/s0001433812020119>
- Smit, P. B., Janssen, T. T., Herbers, T. H. C., 2015. Stochastic Modeling of Inhomogeneous Ocean Waves. *Ocean Modelling*, 96: 26—35. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.06.009>
- Tumanski, S., 2016. Handbook of Magnetic Measurements. CRC Press, Boca Raton.
- Wang, Z. G., 2011. Study on Noise Removing by Wavelet Transform for Dynamic Measuring of Ship Magnetic Field. *Ship Electronic Engineering*, 31 (4): 158—160 (in Chinese with English abstract).
- Weaver, J. T., 1965. Magnetic Variations Associated with Ocean Waves and Swell. *Journal of Geophysical Research*, 70 (8): 1921—1929. <https://doi.org/10.1029/jz070i008p01921>
- Weaver, J. T., 1997. Generation of Magnetic Signal by Waves and Swell, in Transient and Induced Variations in Aeromagnetic. *Rec Aust Geol Surv Organ*, 27: 15—16.
- Xiong, X., Yang, R. J., Wang, H. J., 2015. Airborne Magnetic Anomaly Detection Algorithm for Moving Target under Ocean Wave Generated Magnetic Noise. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 43 (3): 101—106 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. L., Xiao, C. H., Yao, Z. N., 2014. Noise Elimination of Wave-Generated Magnetic Field at Limited Depth in Ship's Dynamic Magnetic Measurement. *Journal of Naval University of Engineering*, 26 (3): 48—51 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 邓鹏, 林春生, 2009. 基于 LMS 算法的自适应滤波器在海浪磁场噪声中的应用. *电子测量技术*, 32 (12): 58—60.
- 葛健, 陆承达, 董浩斌, 等, 2015. 基于 Overhauser 传感器的近地表 UXO 磁梯度法探测技术. *仪器仪表学报*, 36 (5): 38—50.
- 还迎春, 胡海滨, 方石, 2009. 海浪磁场噪声的仿真与消除. *船电技术*, 29 (11): 61—63.
- 王志刚, 2011. 舰船磁场动态测量中的小波消噪技术研究. *舰船电子工程*, 31 (4): 158—160.
- 熊雄, 杨日杰, 王鸿吉, 2015. 海浪磁噪声背景中动目标航空磁异常检测算法. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 43 (3): 101—106.
- 朱兴乐, 肖昌汉, 姚振宁, 2014. 舰艇动态磁性检测中有限深海浪磁场的噪声消除. *海军工程大学学报*, 26 (3): 48—51.