

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2025.02.005

# 基于鞍点优化的自适应弹性网络磁干扰补偿方法

颜齐呈, 赵宜楠, 刘兆霆, 吴瀚

(杭州电子科技大学通信工程学院, 杭州 310000)

**摘要:**传统的磁干扰补偿方法在静态或已知的地磁环境下表现良好,但在环境磁场动态变化的情况下,固定补偿系数可能不再适用,导致补偿效果大幅下降。针对这一问题,提出了一种自适应磁干扰补偿方法。当载体进入新的磁测环境时,根据传感器实时采集的磁场数据,利用鞍点优化的思想对标定的补偿系数进行建模,并结合近端梯度原始对偶算法更新优化框架下的对偶变量以及原始变量,逐步逼近最优解,实时更新补偿系数,确保在不同环境下的磁干扰补偿精度和效率。为了验证所提磁干扰补偿方法的有效性,使用水下载体平台数据和麻省理工学院(MIT)的飞行数据进行分析。结果表明,在不同地磁干扰背景下,此算法能够有效应对多样化的外部磁场干扰,与传统固定补偿系数方法相比,补偿后的磁干扰标准差(STD)降低了57.2%以上,显著降低了载体磁干扰水平。

**关键词:**自适应磁干扰补偿;鞍点优化;近端算子;原始对偶

中图分类号:P631.222;V279

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2025)02-0048-11

## An adaptive elastic network magnetic interference compensation method based on saddle point optimization

YAN Qicheng, ZHAO Yinan, LIU Zhaoting, WU Han

(School of Communication Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** Traditional magnetic interference compensation exhibits satisfactory performance in static or known geomagnetic environments, but the fixed compensation coefficients may no longer be applicable in cases where the ambient magnetic field undergoes dynamic changes, leading to a significant decrease in the compensation effect. To overcome this problem, a novel adaptive magnetic interference compensation method is proposed. When carriers enter a new magnetic environment, saddle point optimization principles are used to model the compensation coefficients calibrated according to real-time magnetic field data from sensors. Meanwhile, the proximal gradient primal-dual algorithm is combined to iteratively update the dual and primal variables within the optimization framework, facilitating convergence to the optimal solution and continuous adjustment of the coefficients. This approach significantly improves the accuracy and efficiency of magnetic interference compensation in varying environments. To demonstrate the effectiveness of the proposed method, data from underwater platforms and aerial data provided by the Massachusetts Institute of Technology (MIT) are analyzed. The results show that the proposed algorithm significantly improves the resilience to various external magnetic disturbances, reducing the standard deviation

收稿日期:2024-09-06;修订日期:2025-01-22

作者简介:颜齐呈(2000—),男,硕士研究生,主要从事信号处理方面的研究。

通信作者:赵宜楠(1977—),男,教授,主要从事无人系统与环境感知、信号处理等方面的研究。

(STD) of compensation by more than 57.2% compared to the traditional fixed-coefficient method, thus significantly minimizing the magnetic interference on the carrier.

**Key words:** Adaptive magnetic interference compensation; Saddle point optimization; Proximal operator; Primal-dual

## 0 引言

在现代航空航天、无人驾驶和导航领域中,随着地磁传感器技术的不断发展,磁场勘测技术在导航系统、矿产资源探测及遥感测绘等领域得到了广泛应用<sup>[1-3]</sup>。然而,地磁传感器的测量精度容易受到载体自身磁干扰以及外部磁环境变化的影响,从而导致测量误差和系统性能的下降。为解决这一问题,磁干扰补偿技术应运而生,通过对磁传感器数据进行校正,可以消除或减小载体机动造成的干扰,提升测量精度。

传统的磁补偿方法是以托勒斯-劳森(Tolles-Lawson, T-L)模型为基础<sup>[4-5]</sup>,在背景地磁场平缓且无额外磁干扰的环境下,驾驶载体完成特定的机动动作,采集磁场数据,并结合特定的参数估计算法离线求解补偿系数,再将其应用于实时测量中。尽管该方法在固定或已知环境中效果显著,但在环境磁场动态变化的情况下,由于外部磁场的不可预测性,仅仅使用固定的补偿系数难以适应此变化,导致补偿效果大打折扣。因此,如何在多变的环境中保持高效的磁补偿效果,成为一个亟待解决的难题。在磁干扰补偿模型中融入自适应的思想,是当前一大热门研究方向:2016年,Dou等<sup>[6]</sup>提出了一种基于小波多分辨率分析的自适应滤波器,在数据预处理阶段通过小波分解和信号重建,削弱飞机机动产生的多重共线性,但该方法将飞机频带限制在一定范围内,不适用于高精度航磁测量;2021年,Dou等<sup>[7]</sup>再次提出了一种基于局部线性回归的自适应磁补偿方法,该方法无需一次性使用全部历史校准数据预先估计模型系数,而是在地磁测量过程中通过局部线性回归实时计算系数,使补偿精度得到进一步提高,然而,该方法会扭曲信号中原有的磁异常波形;2023年,Bi等<sup>[8]</sup>也尝试从补偿模型的多重共线性出发,设计了一种新的建模补偿方法,该方法能自适应地分配变量,为显著性高、共线性低的变量分配最优的补偿模型进一步提高补偿精度。

上述研究将自适应思想应用于载体磁补偿时,均致力于提升载体标定阶段磁干扰补偿系数的求

解精度。然而,他们未考虑到环境磁场的变化在载体补偿阶段对 T-L 模型补偿系数的影响。在实际应用中,由于磁测环境的不断变化,固定的补偿系数可能无法始终有效地补偿磁干扰,需要重新对补偿系数进行标定,大大降低了补偿系数的复用性。

为了解决这一问题,减少磁测环境的变化对磁补偿效果的影响,并提高补偿系数的复用性,提出了一种基于鞍点优化的自适应弹性网络磁干扰补偿方法。该方法利用标定数据估计得到的初始补偿系数,在新的磁测环境中,针对实时采集的数据进一步更新补偿系数以适应环境的变化。此外,该方法利用弹性网络对补偿系数的更新过程进行建模,为更好地处理稀疏性约束,引入对偶范数将弹性网络的求解转换为优化问题,并结合近端梯度原始对偶算法,将其分解为多个子问题,以实现原始变量和对偶变量的更新,得到补偿系数的最优解。利用上述磁干扰补偿方法,当载体平台在新的磁测环境中工作时,该算法能够自适应地动态调整磁补偿系数,实现更为精确和灵活的磁干扰校正。

## 1 基于 T-L 模型的传统载体磁干扰补偿

### 1.1 载体磁干扰模型构建

在实际磁测过程中,磁传感器获取的磁场信息不仅有地磁场信息,也有载体产生的干扰磁场。为了从磁测结果中获取有价值的地磁场矢量信息,需要对磁干扰进行有效补偿。目前,磁补偿研究主要聚焦于以 T-L 模型为基础的软补偿方法,该方法通过建立磁干扰模型,并利用特定的参数估计算法求解磁干扰补偿系数,再对载体磁干扰进行整体补偿。在载体磁干扰补偿中,干扰场由包含一组未知系数的数学模型表示,一旦系数确定,就可以在磁场勘测过程中实时评估和消除磁场干扰<sup>[5]</sup>。一般而言,在实际地磁测量中,估计的系数保持不变。

首先,构建如图 1 所示的载体坐标系  $O-TLV$ ,其中  $L$  轴指向载体正前方。 $T$  轴指向载体左侧方向, $V$  轴指向载体正下方。将标量磁力仪与三分量磁力仪安装在原点  $O$ ,其中三分量磁力仪坐标系的三轴分别与载体坐标系的三轴对准, $B_i$  表示磁力仪

测得的总场,  $\mathbf{B}_e$  为真实地磁场,  $\mathbf{B}_d$  为载体干扰磁场。X, Y, Z 分别表示磁测总场与载体坐标系 3 个轴的夹角:  $\hat{\mathbf{B}}_t = \mathbf{B}_t / |\mathbf{B}_t| = [B_x \ B_y \ B_z]^T$ 。

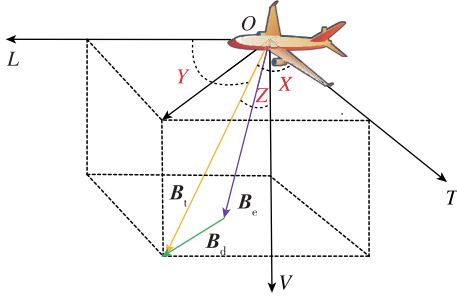


图 1 载体坐标系

Fig. 1 Carrier coordinate system

由于载体磁干扰场的存在,安装在O点的磁力

$$\mathbf{B}_d \cdot \hat{\mathbf{B}}_t = \mathbf{B}_t^T \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \end{bmatrix} + |\mathbf{B}_t| \mathbf{B}_t^T \begin{bmatrix} \beta_4 & \beta_5 & \beta_6 \\ \beta_7 & \beta_8 & \beta_9 \end{bmatrix} \hat{\mathbf{B}}_t + |\mathbf{B}_t| \mathbf{B}_t^T \begin{bmatrix} \beta_{10} & \beta_{11} & \beta_{12} \\ \beta_{13} & \beta_{14} & \beta_{15} \\ \beta_{16} & \beta_{17} & \beta_{18} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{B}}_t \quad (4)$$

其中:  $\hat{\mathbf{B}}_t$  表示地磁场方向余弦的时间导数,本文采用一阶后向差分求得;  $\beta_i$  是未知的三类载体干扰磁场的补偿系数。

记 T-L 模型的矢量系数为  $\boldsymbol{\beta}$ , 化简式(3)及式(4)可得标量磁力仪  $\mathbf{B}_{\text{scalar}}$  的输出表达式

$$\mathbf{B}_{\text{scalar}} - |\mathbf{B}_e| = \mathbf{A}\boldsymbol{\beta} \quad (5)$$

## 1.2 固定补偿系数的参数估计

由式(5)可知,矩阵  $\mathbf{A}$  由光泵磁力仪输出结合三分量磁力仪输出得到,未知项仅有补偿系数  $\boldsymbol{\beta}$ 。为了充分激励补偿系数,使用带通滤波器  $\text{bpf}(\cdot)$  对式(5)进行滤波,考虑到  $\text{bpf}(\cdot)$  是线性的,且地磁场的频率极低,可得到

$$\begin{aligned} \text{bpf}(\mathbf{B}_{\text{scalar}} - |\mathbf{B}_e|) &= \text{bpf}(\mathbf{A}\boldsymbol{\beta}) \\ \text{bpf}(\mathbf{B}_{\text{scalar}}) &= \text{bpf}(\mathbf{A})\boldsymbol{\beta} \end{aligned} \quad (6)$$

值得注意的是,由于矩阵  $\mathbf{A}$  中的自变量之间存在高度相关性,模型无法准确估计各个自变量对因变量的影响程度。并且,多重共线性会导致模型对输入数据中微小变化的敏感性增加,从而使得模型的预测结果变得不稳定。因此,采用基于弹性网络的正则化参数估计方法,求解载体标定阶段的磁补偿系数  $\boldsymbol{\beta}$ 。后续,将在载体补偿阶段通过自适应方法更新此系数。

弹性网络是一种针对最小二乘的拓展方法,其同时结合了 L1 和 L2 正则化项<sup>[9]</sup>。L1 正则化将某

仪输出为真实地磁场与干扰场的矢量叠加形式

$$\mathbf{B}_t = \mathbf{B}_e + \mathbf{B}_d \quad (1)$$

进一步可得到地磁场  $|\mathbf{B}_e|$  的标量式

$$|\mathbf{B}_e| = |\mathbf{B}_t| \sqrt{1 - 2 \frac{\mathbf{B}_t \cdot \mathbf{B}_d}{|\mathbf{B}_t|^2} + \frac{|\mathbf{B}_d|^2}{|\mathbf{B}_t|^2}} \quad (2)$$

由于干扰场相较于总磁场值较小,为了得到 T-L 模型,可以将  $|\mathbf{B}_d|^2 / |\mathbf{B}_t|^2$  忽略不计,并通过泰勒公式对式(2)展开,得到地磁场的标量模型

$$|\mathbf{B}_e| \approx |\mathbf{B}_t| - \mathbf{B}_d \cdot \hat{\mathbf{B}}_t \quad (3)$$

根据 T-L 模型,载体的干扰磁场主要包括 3 个部分,恒定场(由载体硬磁材料产生),感应场(由载体中的软磁物质磁化产生)及涡流场(由载体的导电材料切割地磁场生成的电流所产生)。因此,地磁总场方向的磁干扰模型可以表示为

些特征的权重压缩到零,有助于产生稀疏解,从而实现特征选择的效果。L2 正则化通过在损失函数中加入权重的平方和惩罚项以限制模型的复杂度,减少过拟合风险,改善模型泛化性能,从而提高参数估计的稳定性。弹性网络目标函数如式(7)所示。

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \underset{\boldsymbol{\beta}}{\text{argmin}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \|y_i - \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\beta}\|_2^2 + \lambda_1 \|\boldsymbol{\beta}\|_1 + \frac{1}{2} \lambda_2 \|\boldsymbol{\beta}\|_2^2 \quad (7)$$

其中:  $y_i, \mathbf{x}_i$  分别为第  $i$  时刻的输出数据  $\text{bpf}(\mathbf{B}_{\text{scalar}})$  以及对应的输入数据  $\text{bpf}(\mathbf{A})$ ;  $\lambda_1, \lambda_2$  分别表示 L1, L2 正则化权重。磁干扰补偿就是通过从标量磁力仪和三分量磁力仪等设备采集到的数据建立超定线性方程组,并利用参数估计算法求解补偿系数,计算得到磁干扰强度,从而完成对磁测数据的补偿<sup>[10]</sup>。

## 2 基于自适应策略的载体磁干扰补偿

### 2.1 传统磁干扰补偿问题描述

由校准飞行所估计得到的补偿系数不仅受到载体本身磁干扰的影响,还受到外部环境磁场变化的影响。首先,鉴于载体磁强计周围电磁环境的复杂性,如各种磁源<sup>[11-12]</sup>、非平滑载体运动<sup>[13]</sup>和磁滞效应<sup>[14]</sup>等,可以推断出,仅凭一个具备有限固定系数集的唯一模型,很难极其精确地描述地磁干扰的所有特征。此外,校准飞行过程中还存在不完全采

样的问题,会导致 T-L 模型的条件不完善<sup>[12]</sup>,即使设计一个更复杂的模型,这一问题仍然存在。其次,地磁系数本身会随着地磁场变化而发生突变<sup>[10]</sup>,不同环境(如城市、海洋及山区)中的地磁场分布差异显著,在固定或已知环境中,磁补偿系数可以通过先验采集的数据进行精确计算,并应用于实时测量中。然而,一旦环境磁场变化过大,原有的补偿系数可能不再适用,导致补偿效果明显下降。

## 2.2 基于鞍点优化的自适应弹性网络磁干扰补偿方法

自适应算法是一类能够根据输入数据的变化,实时分析和响应信号特性的变化,动态调整其行为和参数的算法。与静态算法不同,该算法具有灵活性和适应性的特点,能够在不同的环境和条件下优化其性能。该算法可通过反馈机制自动优化参数,保证信号处理的精确度和效率,从而极大地提升系统的鲁棒性和灵活性。

鞍点优化作为数学优化的一种方法,在凹凸结构问题的优化中有着重要作用,其核心原理是利用其对偶性,不断交替不同变量以寻找函数的鞍点,即全局最优解。在这种优化框架下,目标函数通过选择不同维度的最大化或最小化,从而找到同时满足这两个条件的稳定解。因此,它在解决如正则化参数估计、博弈论等复杂约束优化问题时表现优异。

鉴于上述磁干扰补偿问题,在传统磁干扰估计的基础上,提出了在磁测的补偿阶段融入自适应的思想。在补偿阶段,针对实时采集的地磁数据,采用鞍点优化的对偶性求解基于正则化参数估计的复杂约束优化问题。在此框架下,利用近端梯度原始对偶算法逼近最优解。该解在补偿系数的维度上能最小化误差,而在调整参数的维度上则追求最大化调整效率。一旦确立了初步的自适应补偿参数,即不再从头开始寻优,而是基于已有的结果(即上一轮调整的补偿系数)进行微调。通过该方法动态调整后的补偿系数,有效解决了环境磁场变化对磁补偿效果的影响,确保了磁传感器在不同磁干扰环境下的补偿精度。具体实现方式如下。

首先,构建的自适应弹性网络目标函数如式(8)所示。

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = \underset{\boldsymbol{\beta}}{\operatorname{argmin}} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \gamma^{n-i} \|y_i - \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\beta}\|_2^2 + \lambda_1 \|\boldsymbol{\beta}\|_1 + \frac{1}{2} \lambda_2 \|\boldsymbol{\beta}\|_2^2 \quad (8)$$

其中,  $\gamma$  为引入的遗忘因子,通过逐渐减小旧数据的权重,增加对新数据的敏感性,从而使算法能够适应环境磁场的变化,达到自适应的效果。

其次,利用对偶范数表示式中优化目标函数的正则化项,对于 L1 范数,其对偶范数是  $L_\infty$  范数

$$\|\boldsymbol{\beta}\|_1 = \max_{\|\mathbf{z}\|_\infty \leq 1} \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{z} \quad (9)$$

其中,  $\mathbf{z}$  是引入的对偶变量。将式(9)代入优化目标函数

$$\boldsymbol{\beta} = \underset{\boldsymbol{\beta}}{\operatorname{argmin}} (S_n(\boldsymbol{\beta}) + \lambda_1 \max_{\|\mathbf{z}\|_\infty \leq 1} \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{z}) \quad (10)$$

其中,  $S_n(\boldsymbol{\beta}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \gamma^{n-i} \|y_i - \mathbf{x}_i^T \boldsymbol{\beta}\|_2^2 + \frac{1}{2} \lambda_2 \cdot \|\boldsymbol{\beta}\|_2^2$ 。由于式(10)引入了新的变量  $\mathbf{z}$ , 将其转化为鞍点优化问题的形式

$$\{\mathbf{z}, \boldsymbol{\beta}\} = \underset{\boldsymbol{\beta}}{\operatorname{argmin}} \max_{\mathbf{z} \in Z} S_n(\boldsymbol{\beta}) + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{z} \quad (11)$$

$$Z = \{\mathbf{z} : \|\mathbf{z}\|_\infty \leq \lambda_1\}$$

定义指示函数

$$I_Z(\mathbf{z}) = \begin{cases} 1, & \mathbf{z} \in Z \\ \infty, & \mathbf{z} \notin Z \end{cases} \quad (12)$$

将式(11)的约束优化问题转化为无约束优化问题

$$\{\mathbf{z}, \boldsymbol{\beta}\} = \underset{\boldsymbol{\beta}}{\operatorname{argmin}} \max_{\mathbf{z}} S_n(\boldsymbol{\beta}) + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{z} - I_Z(\mathbf{z}) \quad (13)$$

利用近端梯度原始对偶算法求得式(13)原始变量以及对偶变量的迭代框架为

$$\begin{cases} \boldsymbol{\beta}_n = \underset{\boldsymbol{\beta}}{\operatorname{argmin}} S_n(\boldsymbol{\beta}) + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{z}_{n-1} \\ \mathbf{z}_n = \operatorname{prox}_{vI_Z}(\mathbf{z}_{n-1} + \mathbf{v}(2\boldsymbol{\beta}_n - \boldsymbol{\beta}_{n-1})) \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $\operatorname{prox}_{vI_Z}(\cdot)$  定义为凸函数的近端算子,  $\mathbf{v}$  表示更新步长

$$\operatorname{prox}_{vI_Z}(\mathbf{x}) = \underset{\mathbf{z}}{\operatorname{argmin}} \left\{ \frac{1}{2\mathbf{v}} \|\mathbf{x} - \mathbf{z}\|_2^2 + I(\mathbf{z}) \right\} \quad (15)$$

通过交替更新原始变量和对偶变量,即可根据实时采集数据动态调整补偿系数,从而确保当载体在进入不同的地磁背景环境时,依旧能达到良好的补偿精度。更新步骤如下所示。

步骤 1 更新原始变量  $\boldsymbol{\beta}_n$ : 首先对  $\boldsymbol{\beta}$  求导并令其等于 0, 可以得到

$$\boldsymbol{\beta}_n = \left( \sum_{i=1}^n \gamma^{n-i} \mathbf{x}_i \mathbf{x}_i^T + \lambda_2 \mathbf{I} \right)^{-1} \cdot \left( \sum_{i=1}^n \gamma^{n-i} y_i \mathbf{x}_i - \mathbf{z}_{n-1} \right) \quad (16)$$

令  $\mathbf{P}_0^{-1} = \lambda_2 \mathbf{I}$ , 可得:  $\mathbf{P}_n^{-1} = \gamma \mathbf{P}_{n-1}^{-1} + \mathbf{x}_n \mathbf{x}_n^T + (1 - \gamma) \lambda_2 \mathbf{I} = \mathbf{Q}_n^{-1} + (1 - \gamma) \lambda_2 \mathbf{I}$ 。

根据 Sherman-Morrison 公式<sup>[15]</sup>对  $\mathbf{Q}_n$  展开, 得到原始变量  $\boldsymbol{\beta}_n$  的更新式

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\beta}_n &= \mathbf{P}_n \mathbf{q}_n - \mathbf{P}_n \mathbf{z}_{n-1} \\ &= \boldsymbol{\beta}_{n-1} + (\mathbf{y}_n - \mathbf{x}_n^T \boldsymbol{\beta}_{n-1}) \mathbf{k}_n - \\ &\quad \mathbf{P}_n \mathbf{z}_{n-1} + (\mathbf{I} - \mathbf{k}_n \mathbf{x}_n^T) \mathbf{P}_{n-1} \mathbf{z}_{n-2}\end{aligned}\quad (17)$$

其中,  $\mathbf{k}_n = \mathbf{P}_n \mathbf{x}_n$ , 中间变量  $\mathbf{q}_n = \sum_{i=1}^n \gamma^{n-i} \mathbf{y}_i \mathbf{x}_i = \gamma \mathbf{q}_{n-1} + \mathbf{y}_n \mathbf{x}_n$ 。

步骤2 更新对偶变量  $\mathbf{z}_n$ ; 定义辅助变量  $\bar{\boldsymbol{\beta}}_n =$

$\mathbf{z}_{n-1} + \mathbf{v}(2\boldsymbol{\beta}_n - \boldsymbol{\beta}_{n-1})$ , 可知  $\mathbf{z}_n = \arg \min_{\mathbf{z} \in \mathcal{Z}} (\|\mathbf{z} - \bar{\boldsymbol{\beta}}_n\|^2 / 2\mathbf{v})$ , 其中,  $\mathbf{z}$  的第  $l$  行矢量可通过式(18)求得

$$z_{n,l} = \begin{cases} -\lambda_1, & \bar{\beta}_{n,l} < -\lambda_1 \\ \lambda_1, & \bar{\beta}_{n,l} > \lambda_1 \\ \bar{\beta}_{n,l}, & -\lambda_1 < \bar{\beta}_{n,l} < \lambda_1 \end{cases} \quad (18)$$

上述基于鞍点优化的自适应弹性网络算法的磁补偿流程如图2所示。

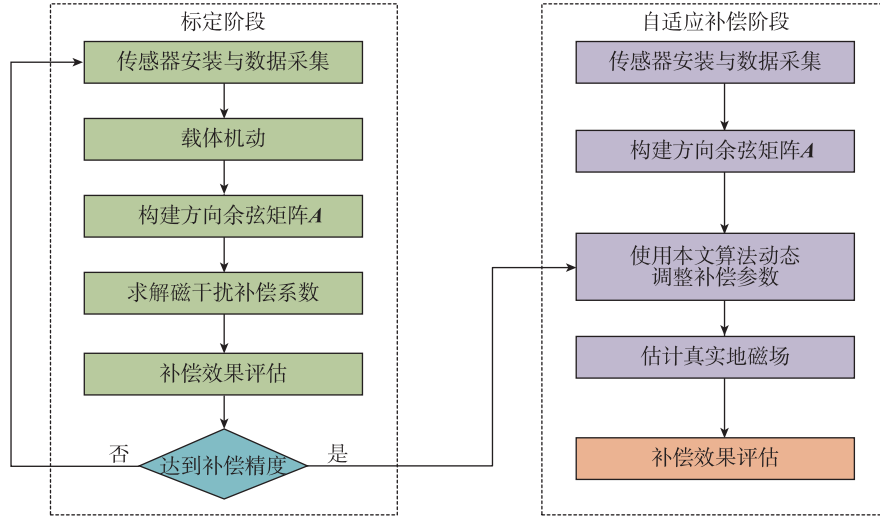


图2 基于自适应弹性网络算法的磁补偿流程

Fig. 2 Magnetic compensation process based on adaptive elastic network algorithm

### 3 实验验证与结果分析

为了验证本文算法的有效性,分别利用水下载体平台数据和空中飞行平台数据进行验证。每组实验均在不同的地磁环境下分别进行离线载体补偿系数的标定以及在线磁干扰补偿实验,并利用补偿前后的剩余磁干扰标准差(standard deviation,

STD)和改善比(improvement ratio, IR)评估补偿精度。

#### 3.1 实验1:水下载体平台的磁干扰补偿实验

在实验1中,使用一种基于水下潜航器拖体的磁测量系统采集数据,其中磁力仪为铷标量传感器和三轴磁通门矢量传感器,采样率均为10 Hz。整个系统结构如图3所示。

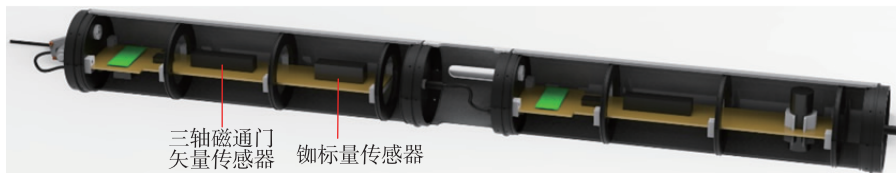


图3 舱体结构图

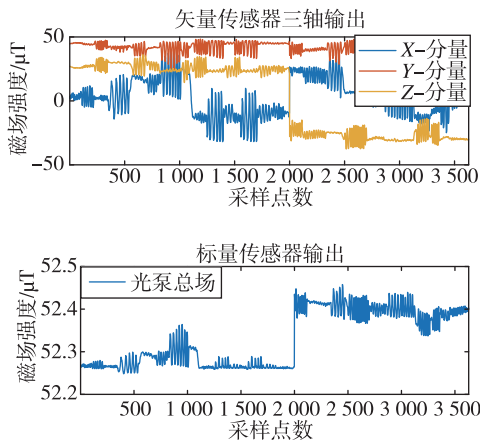
Fig. 3 Structural diagram of the capsule

首先,将磁测系统固定安装于水下潜航器舱体内,并挑选地磁场均匀的地磁环境进行标定实验。其中,根据地磁场的频段,采用截止频率为0.1 Hz的低通滤波器得到的地磁场强度约为52 295 nT。

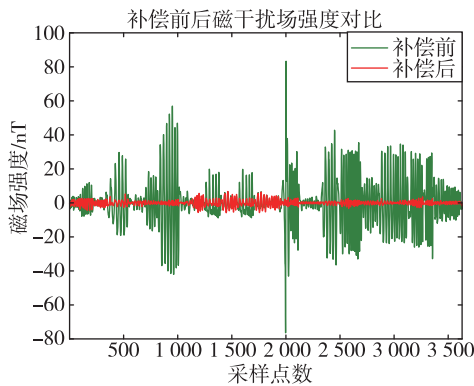
具体步骤如下:首先,搭建简易无磁吊架,将水下潜航器安装在吊架上,使其悬空,并保证其稳定性和足够的姿态机动空间;在进行姿态机动前,预先探测到探头的死区范围;在实验时,实验人员在东、

南、西及北 4 个方向进行等效于校准飞行的俯仰、偏航及横滚 3 种机动动作晃动拖体;最后,对采集到的数据进行分析和处理,并利用上述载体磁干扰模型和弹性网络算法求解初始磁补偿系数。

磁测系统所采集到的数据以及补偿结果分别如图 4(a)和图 4(b)所示。其中,求解磁干扰补偿系数所用到的参数如下:带通滤波器频带为 0.1~0.9 Hz,弹性网络的 L1,L2 正则化权重参数  $\lambda_1, \lambda_2$  分别为 0.001 和 0.025,遗忘因子  $\gamma$  为 0.999 9。



(a) 地磁测量系统输出数据



(b) 补偿前后磁干扰强度对比

图 4 陆地标定实验结果

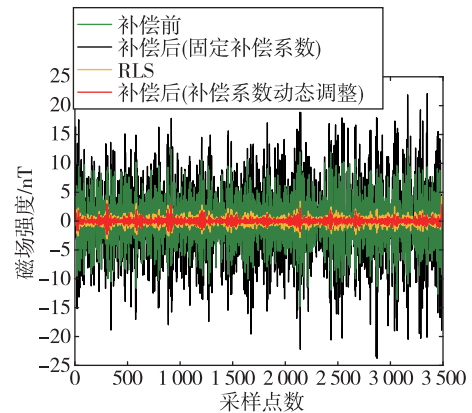
Fig. 4 Results of land-based calibration experiments

标定前后的磁干扰 STD 分别为 65.09 nT 和 5.135 nT。从补偿结果可知,利用式(7)弹性网络算法估计出的固定磁补偿系数,能够很好地消除载体机动产生的磁干扰,达到了载体标定阶段磁干扰补偿所需要的精度。其次,挑选与标定实验截然不同的地磁环境进行在线补偿实验,以验证不同磁干扰环境对补偿结果的影响。为了使实验结果对比

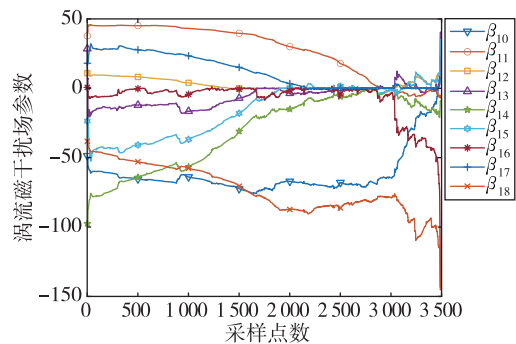
更加明显,分别在海试环境和湖试环境进行了对照实验。针对传感器实时采集到的地磁数据,每组对照组分别使用固定的磁补偿系数和经过本文算法动态调整后的补偿系数进行补偿,并对比补偿精度。

对照组 1:选择海面作为第一组对照组的实验场地,利用低通滤波器测得地磁场强度约为 48 573 nT。将磁拖体使用无磁线缆与实验船只固定连接,并驾驶实验船只任意航行。通过不断更改磁拖体的运动路径和速度,以充分激励补偿系数的变化。实时采集水下地磁数据,同时,利用在地面环境中估计出的固定磁补偿系数直接对采集到的水下地磁数据进行补偿,补偿后磁干扰强度如图 5(a)黑色曲线所示。

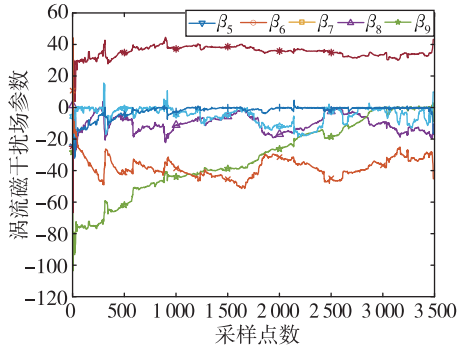
在对照组 1 的基础上,使用本文算法对磁补偿系数进行动态调整,使其适应环境的变化,补偿后的磁干扰强度如图 5(a)红色曲线所示。增加递归最小二乘(recursive least squares, RLS)算法与本文算法的对比,如图 5(a)黄色线条所示,以体现正则化项的优势。对照组 1 的涡流场和感应场补偿系数的动态调整趋势分别如图 5(b)和图 5(c)所示。其中,RLS 算法所需参数与本文算法相同,补偿系数动态调整步长  $\nu$  为 0.9。



(a) 对照组 1 补偿参数动态调整前后对比



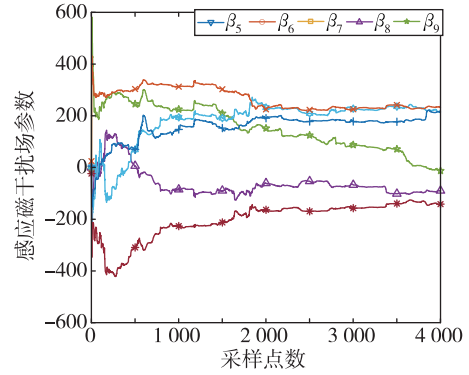
(b) 对照组 1 涡流场系数动态调整趋势



(c) 对照组 1 感应场系数动态调整趋势

图 5 实验 1 对照组 1 补偿结果对比

Fig. 5 Comparison of compensation results for control group 1 in experiment 1



(c) 对照组 2 感应场系数动态调整趋势

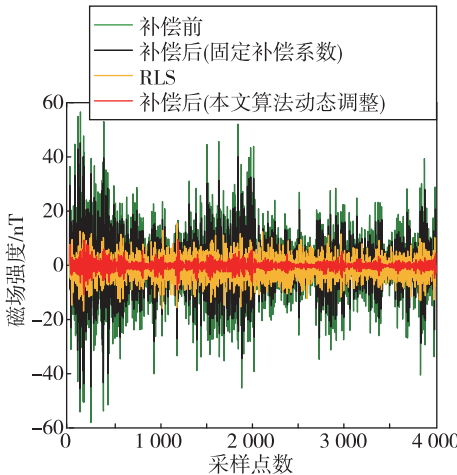
图 6 实验 1 对照组 2 补偿结果对比

Fig. 6 Comparison of compensation results for control group 1 in experiment

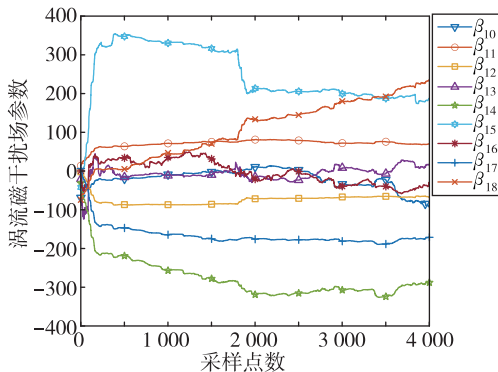
对照组 2: 将实验环境从海面改为湖面, 实验参数与对照组 1 相同, 同样使用截止频率为 0.1 Hz 的低通滤波器得到湖面地磁场强度约为 52 379 nT. 对比本文所提算法和固定补偿系数的补偿效果, 实验结果如图 6 所示. 值得注意的是, 由于硬磁场是由载体的硬磁材料产生的, 除非载体的结构或内容

发生改变, 否则就是恒定的, 因此, 仅展示感应场和涡流场的动态变化趋势.

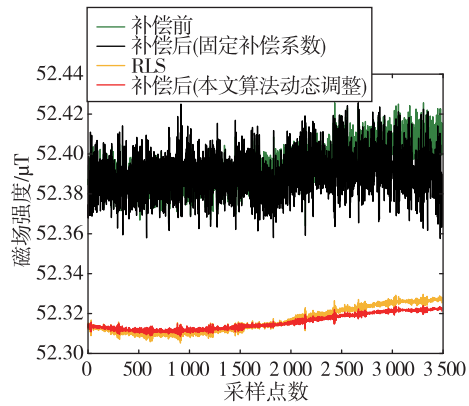
实验 1 补偿前后总场强度以及磁干扰数据对比分别如图 7 和表 1 所示.



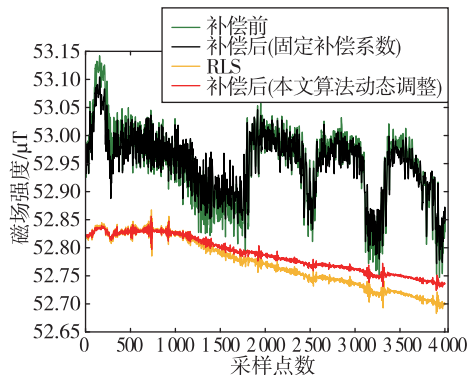
(a) 对照组 2 补偿参数动态调整前后对比



(b) 对照组 2 涡流场系数动态调整趋势



(a) 对照组 1 补偿前后总场对比



(b) 对照组 2 补偿前后总场对比

图 7 实验 1 补偿前后磁总场对比

Fig. 7 Comparison of the total magnetic field before and after compensation in experiment 1

表 1 实验 1 磁干扰补偿系数动态调整前后对比

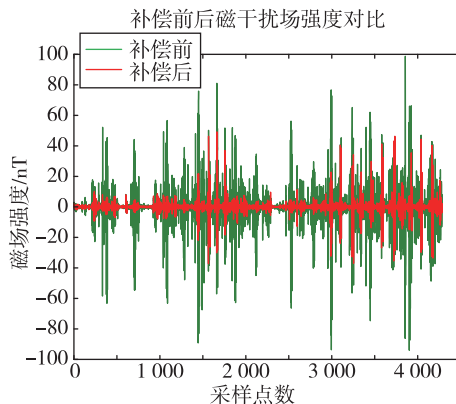
Tab. 1 Comparison of magnetic interference compensation parameters before and after dynamic adjustment in experiment 1

数据例	补偿前磁干扰 STD/nT	磁干扰补偿方式	补偿后磁干扰 STD/nT	IR
实验 1 对照组 1	3.935 7	固定补偿系数	6.485 1	0.606 9
		RLS 算法	0.845 4	4.655 4
实验 1 对照组 2	14.069 2	固定补偿系数	10.564 1	1.331 7
		RLS 算法	4.258 7	3.303 5
		本文算法	2.080 8	6.761 3

3.2 实验 2: 空中飞行平台的磁干扰补偿实验

在实验 2 中, 本文验证了该算法在飞行数据中的应用, 其中飞行数据来自于麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT)<sup>[9]</sup>, 用于对比在相似地磁背景环境下本文算法与采用固定磁补偿系数方法的补偿精度。实验步骤如下: 首先, 根据 MIT 飞行日志的描述, 选择其中标量传感器 (采样频率为 10 Hz) 摆放位置为飞机后舱天花板; 矢量传感器 (采样频率为 10 Hz) 摆放在机舱中部, 靠近油箱位置的标定飞行路线数据 (航线编号为 1006.04, 位于安大略省东部) 作为标定航线, 对磁补偿系数进行标定。其中, 根据飞行日志和采集数据得到此处的地磁场强度约为 53 885 nT, 标定所需要的参数与实验 1 相同。传感器输出数据和标定结果如图 8 所示, 其中标定前后的磁干扰 STD 分别为 13.876 nT 和 3.121 6 nT。

其次, 挑选相似地磁背景环境进行补偿飞行实验。由于数据来源的局限性, 通过挑选不同航线以



(b) 补偿前后磁干扰强度对比

图 8 空中标定实验结果

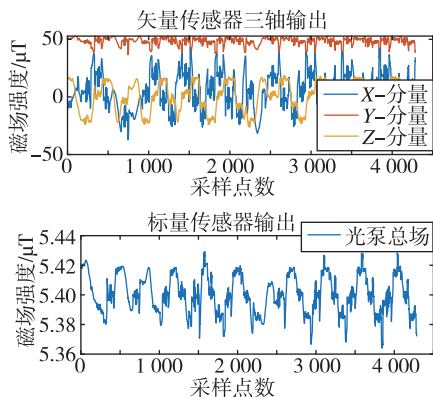
Fig. 8 Results of air calibration experiments

及改变标量传感器的摆放位置以增大不同地磁区域的干扰差别。针对实验 2, 根据不同的补偿飞行航线, 同样地设计了 2 组对照实验。

对照组 1: 对照组 1 选择编号为 1005.02 的补偿飞行航线 (同样位于安大略省东部), 地磁场强度约为 53 481 nT。将标量传感器摆放位置更改为后舱地板, 其中, 补偿系数保持与标定航线相同, 补偿系数动态调整参数与实验 1 相同。对比使用本文算法动态调整磁补偿系数前后的补偿结果, 如图 9 所示。

对照组 2: 更改补偿航线为 1007.06 航线 (位于珀斯), 地磁场强度约为 54 121 nT, 传感器摆放位置以及本文算法的调整参数均与对照组 1 相同, 实验结果如图 10 所示。

实验 2 补偿前后总场强度以及磁干扰数据对比分别如图 11 和表 2 所示。对比上述实验结果不难发现, 在不同的地磁环境下, 如果仅仅使用固定的磁干扰补偿系数是远远不够的, 甚至可能会起到相反的作用。一般而言, 针对此类情况, 只能选择再次对补偿系数进行标定, 并重新评估补偿效果。而本文算法能够在仅使用一次载体磁干扰标定的情况下, 根据环境磁场的变化动态调整补偿系数。相较于在不同的地磁环境下使用固定的磁补偿系数, 本文算法无论是在水下还是空中地磁环境下, 都展现出很好的性能提升。在处理弹性网络的正则化项多重共线性问题时, 相较于其他自适应算法也有较为明显的优势。其中, 针对 2 组实验的 STD 降低了 57.2% 以上, IR 能达到 2.206 4~9.076 7。



(a) 地磁测量系统输出数据



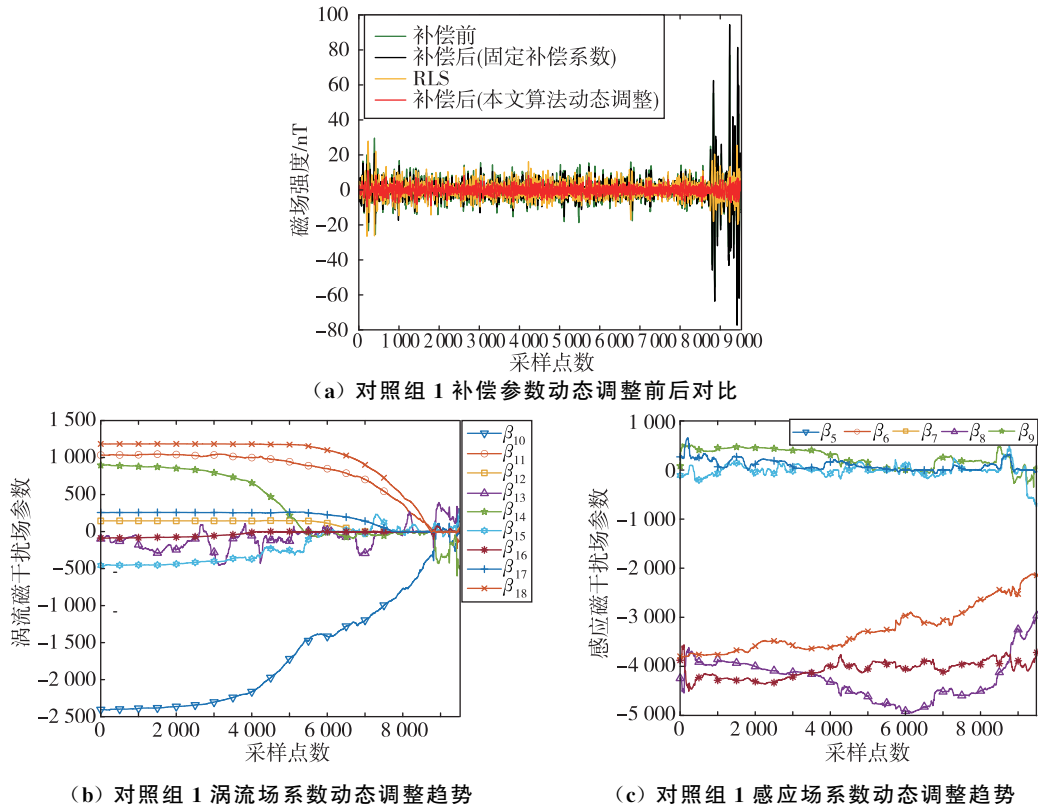


图 9 实验 2 对照组 1 补偿结果对比

Fig. 9 Comparison of compensation results for control group 1 in experiment 2

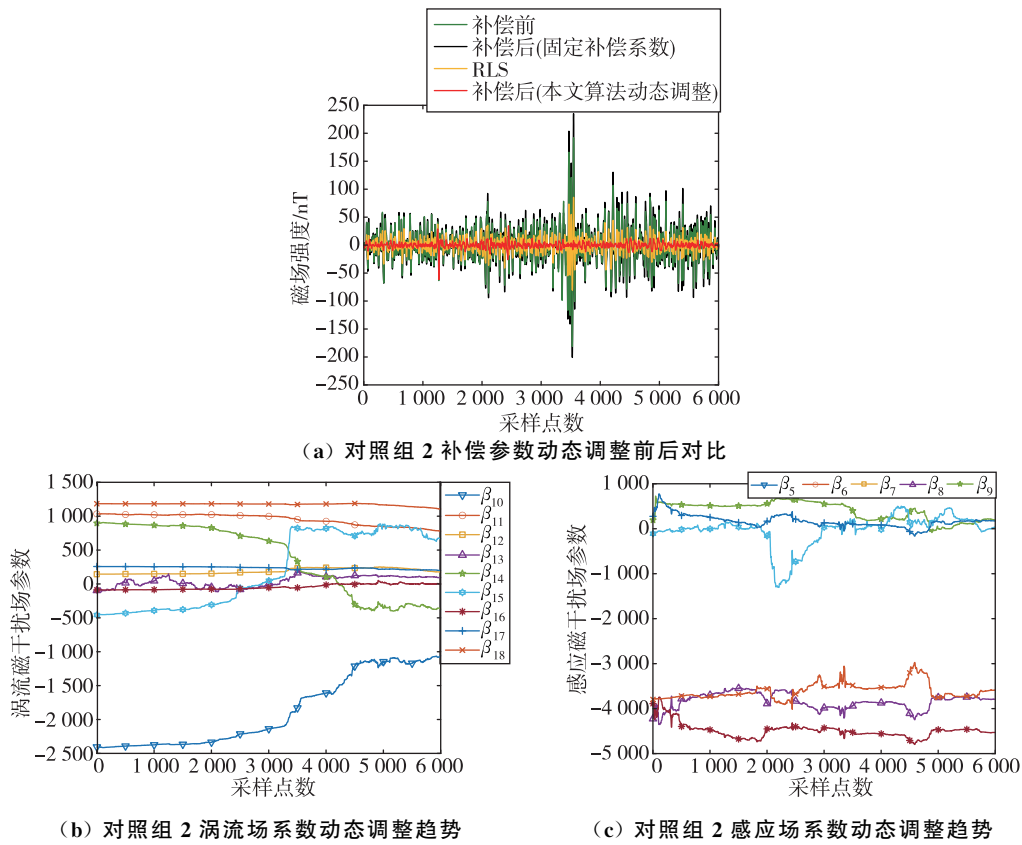
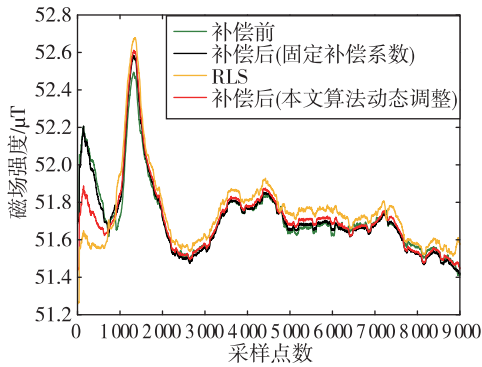
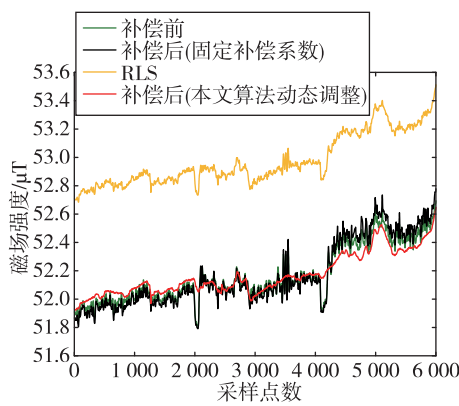


图 10 实验 2 对照组 2 补偿结果对比

Fig. 10 Comparison of compensation results for control group 2 in experiment 2



(a) 对照组 1 补偿前后总场对比



(b) 对照组 2 补偿前后总场对比

图 11 实验 2 补偿前后磁总场对比

Fig. 11 Comparison of the total magnetic field before and after compensation in experiment 2

表 2 实验 2 磁干扰补偿系数动态调整前后对比

Tab. 2 Comparison of magnetic interference compensation parameters before and after dynamic adjustment in experiment 2

数据例	补偿前磁干扰 STD/nT	磁干扰补偿方法	补偿后磁干扰 STD/nT	IR
对照组 1	8.508 2	固定补偿系数	9.013 1	0.943 9
		RLS 算法	5.030 4	1.691 3
		本文算法	3.856 2	2.206 4
对照组 2	31.294 1	固定补偿系数	35.734 2	0.875 7
		RLS 算法	14.308 4	2.187 1
		本文算法	5.030 4	6.220 9

## 4 结论

在复杂多变的地磁环境下,固定补偿系数无法始终保持高效的补偿精度。本文在磁干扰补偿的基础上引入了自适应的策略,提出了一种基于鞍点优化的自适应弹性网络算法,旨在动态调整补偿系

数,以应对地磁变化、环境噪声及磁场干扰等因素对补偿效果的影响。相较于固定补偿系数和 RLS 算法,本文算法体现出以下优势。

1)固定补偿系数无法始终满足磁干扰补偿的精度需求,若是反复标定评估,损耗不可估量,本文算法在一次系数标定的基础上,实现补偿系数的自适应调整,大大提高了补偿系统的鲁棒性。

2)RLS 算法作为经典的自适应参数估计算法,能够在时变系统中实现快速收敛。但在处理高维参数估计问题,尤其是在特征之间存在较强相关性和高噪声环境下,RLS 算法的稀疏性和鲁棒性有所欠缺。而本文算法通过结合弹性网络正则化项以及鞍点优化的迭代框架,进一步提高了磁干扰补偿精度,实测数据显示,STD 降低了 57.2% 以上,IR 能达到 2.206 4~9.076 7。

本研究为磁干扰补偿领域提供了一种新的思路,特别是在动态变化的磁测环境下,所提出的自适应弹性网络算法具有较强的适应性和实际应用价值。通过进一步的优化和改进,该算法有望在更多实际应用中提供稳定、精确的磁干扰补偿方案。

## 参考文献

[1] JIANG D, ZENG Z, ZHOU S, et al. Integration of an aeromagnetic measurement system based on an unmanned aerial vehicle platform and its application in the exploration of the Ma'anshan magnetite deposit [J]. IEEE Access, 2020, 8: 189576-189586.

[2] 苏轶娜. 我国重要矿产资源供需形势研究[J]. 我国国土资源经济, 2019, 32(7): 46-51.

SU Yina. Study on supply and demand situation of important mineral resources in China[J]. Natural Resource Economics of China, 2019, 32(7): 46-51 (in Chinese).

[3] 熊盛青. 航空地球物理勘查科技创新与应用[J]. 地质力学学报, 2020, 26(5): 791-818.

XIONG Shengqing. Innovation and application of airborne geophysical exploration technology[J]. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 791-818 (in Chinese).

[4] TOLLES W E. Compensation of aircraft magnetic fields; 2692970[P]. 1954-10-26.

[5] TOLLES W E. Magnetic field compensation system; 2706801[P]. 1955-04-19.

[6] DOU Z J, HAN Q, NIU X M, et al. An adaptive filter for aeromagnetic compensation based on wavelet multiresolution analysis[J]. IEEE Geoscience and

- Remote Sensing Letters, 2016, 13(8): 1069-1073.
- [7] DOU Z J, LIU C H, WANG J R, et al. An adaptive aeromagnetic compensation method based on local linear regression[C]// Proceedings of IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing Ltd., 2021, 783(1): 012090.
- [8] BI F Y, YU P, JIAO J, et al. An adaptive modeling-based aeromagnetic maneuver noise suppression method and its application in mine detection[J]. Remote Sensing, 2023, 15(18): 4590.
- [9] GNADT A R. Advanced aeromagnetic compensation models for airborne magnetic anomaly navigation [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2022.
- [10] LELIAK P. Identification and evaluation of magnetic-field sources of magnetic airborne detector equipped aircraft[J]. IRE Transactions on Aeronautical and Navigational Electronics, 1961, ANE-8(3): 95-105.
- [11] DU C P, WANG H D, WANG H, et al. Extended aeromagnetic compensation modelling including non-maneuvring interferences[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2019, 13(7): 1033-1039.
- [12] WOLOSZYN M. Analysis of aircraft magnetic interference[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012, 39(1-4): 129-136.
- [13] BICKEL S H. Small signal compensation of magnetic fields resulting from aircraft maneuvers[J]. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, 1979, AES-15(4): 518-525.
- [14] BICKEL S H. Error analysis of an algorithm for magnetic compensation of aircraft[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1979, AES-15(5): 620-626.
- [15] DENG C Y. A generalization of the Sherman-Morrison-Woodbury formula [J]. Applied Mathematics Letters, 2011, 24(9): 1561-1564.

(编辑:黄利华)