

地磁测量卫星的矢量磁场在轨标定算法仿真*

杜 雯 黄 河 周 军

(西北工业大学航天学院 西安 710072)

摘 要 以 SWARM 为代表的高精度地磁测量卫星对地球磁场探测精度经过标定之后优于 0.5 nT, 对于开展地磁科学研究具有重要意义。地磁测量卫星通过安装在伸展杆上的矢量磁通门磁强计、标量磁强计和高精度星敏感器, 获取测量方向的惯性空间姿态的地磁信息, 其中高精度标量磁强计主要用于对磁通门矢量磁强计进行标定。针对地磁测量卫星, 研究了矢量磁强计在轨测量误差的校正方法。考虑到矢量磁强计非正交角、标度因子以及偏差的影响, 建立磁场矢量线性输出模型; 结合标量磁强计的测量值分别设计基于小量近似的线性校正算法和基于参数辨识更新的非线性校正算法; 校验两种算法的标定精度, 并通过 Tukey 权重函数改善算法的鲁棒性。仿真结果表明, 两种算法校正结果相似, 磁场三轴误差可校正至 0.5 nT 以内, 在标量磁强计存在异常值时仍具有较好的校正效果。

关键词 地磁测量卫星, 矢量磁强计, 标量磁强计, 误差校正

中图分类号 P353.1

Simulation of Vector Magnetic Field In-orbit Calibration Algorithm for Geomagnetic Survey Satellite

DU Wen HUANG He ZHOU Jun

(School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract The precision of geomagnetic survey satellites represented by SWARM is better than 0.5 nT for detection of the Earth's magnetic field after calibration. The satellites obtain the geomagnetic information of inertial space attitude in measurement direction through the vector fluxgate magnetometer, scalar magnetometer and high-precision star tracker installed on the extension boom. The high-precision scalar magnetometer is mainly used to calibrate the fluxgate vector magnetometer. Calibration methods of in-orbit measurement error of vector magnetometer are proposed for geomagnetic survey satellite. Considering the non-orthogonal angles, scale factors and deviations of vector magnetometer, the linear output model of magnetic field vector is established. The linear correction algorithm based on

* 国家自然科学基金面上项目资助 (62073261)

2021-12-23 收到原稿, 2022-06-09 收到修定稿

E-mail: duwen1998@163.com. 通信作者 黄河, E-mail: huanghe1984@nwpu.edu.cn

small approximation and nonlinear correction algorithm based on parameters identification update are designed respectively combined with the measurement values of scalar magnetometer. The calibration accuracy of algorithms is verified, and the robustness of the algorithms is improved by Tukey weight function. Simulation results show that the correction results are similar, the triaxial errors of magnetic field can be corrected to less than 0.5 nT, and the algorithms still have a good correction effect when there is an outlier in scalar measurements.

Key words Geomagnetic survey satellite, Vector magnetometer, Scalar magnetometer, Error correction

0 引言

地磁测量卫星是获取高精度地球磁场数据的重要手段,可为资源勘探、磁场导航、空间环境监测等领域提供技术支撑^[1,2],例如丹麦 Oersted 卫星、德国 CHAMP 卫星、欧空局 Swarm 星座任务以及中国张衡一号电磁监测试验卫星等。中国目前正在开展高精度磁场测量卫星的研制,然而对于高精度磁场测量卫星的数据标定问题,特别是从 0 级到 1 级数据的处理,还缺少系统研究^[3]。

高精度地磁测量卫星的地磁场测量载荷主要包括矢量磁强计、标量磁强计和星敏感器。其中,矢量磁强计探测三分量矢量磁场,标量磁强计探测地磁场强度。通常为了避免卫星本体磁场干扰对磁强计测量的影响,将磁强计安装在星体外伸展杆的光学平台上。由于工艺水平的限制,矢量磁强计在实际使用过程中受到三轴非正交角、标度因子以及偏差的影响,其测量值不能作为绝对准确值。在卫星发射前,矢量磁强计会在实验室进行校正和对准(飞行前校正)^[4]。由于卫星在轨运行的环境条件实验室无法真实模拟,同时矢量磁强计的偏差和标度因子受时间和温度的影响,矢量磁强计数据的定期校准是保证精确测量的必然选择^[5]。

地球磁测卫星磁场数据校正精度要求高,校正过程需考虑测量仪器参数的变化以及矢量磁强计所处平台的条件,保证校正后的磁场误差在满足精度要求的前提下尽可能节省运算时间。

对于卫星地磁场数据校正问题,主要有两种思路:一是采用基于椭球轨迹约束的误差修正方法,即针对固定点的磁场测量值约束在椭球轨迹上^[6-7],该方法限制磁场强度为定值,不符合地磁测量卫星大范围

磁场测量的要求;二是卫星在轨工作过程中,对磁强计进行标定,其基本思想是基于大量在轨实测磁场强度数据和磁场三分量矢量数据,由两种数据获取磁场强度的标量差值,进而辨识磁强计误差参数,保证在仪器参数变化情况下仍能获取高精度磁场数据。对于矢量磁强计的标定问题,文献 [8,9] 利用 CryoSat-2 卫星在轨数据,探讨了星体内平台磁强计测量数据的预处理和校准步骤,并考虑了蓄电池、太阳能电池以及磁力矩器引起的磁干扰;文献 [10] 结合已校准的磁场数据和地磁台数据对多个卫星平台磁强计的参数和磁场参数进行联合估计,建立了时变地磁场模型;文献 [11] 针对高精度星敏感器受温度影响带来的误差进行研究,采用欧拉角与平台不同位置温度的线性关系进行建模分析,改善了姿态确定精度,得出星敏感器坐标系与地磁参考系之间的误差角并非完全由光行差引起,同时受平台温度分布影响的结论。文献 [12] 研究了在 CHAMP 卫星与 SWARM 卫星数据空缺的情况下,采用线性化方法对卫星平台式磁强计数据进行校准整理,弥补了数据空缺;文献 [13] 采用改进的最小二乘算法,对磁通门磁强计三轴正交性和零点漂移进行修正,但其校正模型需进行多项式代入合并,过程较为繁复。对于矢量磁强计多参数估计的情况,计算过程更加复杂。

本文针对地磁测量卫星数据精度要求高、外部环境条件不确定等特点,考虑矢量磁强计非正交角、标度因子和偏差的影响,建立矢量磁强计 9 参数线性误差模型,利用标量磁强计的磁场强度数据,分别设计了基于小量近似的线性校正算法和基于参数辨识更新的非线性校正算法并进行仿真校验,实现对矢量磁强计参数的辨识分析,考虑了测量噪声对校正算法精度的影响。同时,为避免标量测量值中的异常值对算

法精度的影响,将算法中的权重函数改进为 Tukey 权重函数。结果表明,在矢量磁强计 9 参数误差模型及特定的噪声状态下,线性算法与非线性算法校正结果相似,误差均在 0.5 nT 以内,满足高精度磁场数据探测的需求,适用于地磁测量卫星的 0 级数据校正。

1 矢量磁强计线性输出模型

地磁测量卫星为保证地磁场测量的精确性,配备有多种磁场测量载荷,包括 VFM 矢量磁强计、ASM 标量磁强计以及高精度星敏感器。在卫星进行磁场数据处理之前,应已根据 GNSS 载荷观测得到精密轨道数据;矢量磁强计测量其坐标系下磁场三分量值,标量磁强计测量地磁场总强度,校准磁场矢量测量结果;去除卫星本体的磁场扰动,对磁场数据进行重采样,结合惯性姿态信息将磁强计输出磁场转换至地理坐标系下。所有处理部分均依赖于发射前在地面对载荷与卫星进行的标定与测试,其标定测试的参数结果准确性决定了星上数据处理的精度。为获取矢量磁强计的精确指向信息,同时保证磁场测量精度,矢量磁强计与星敏感器安装在星体外伸展杆中部的光学平台上^[14]。高精度星敏感器包含三个观测单元,测量矢量磁强计的惯性姿态信息(孔间角误差 $<3''$)。该安装结构在 Oersted, CHAMP 和 SWARM 卫星上都有所应用。此结构既减小了矢量磁强计内部线圈对标量磁强计磁场测量的影响,还可以确保磁强计输出结果中来自卫星本体磁场的磁净度。本文重点研究矢量磁强计输出数据在非正交角、标度因子以及偏差的影响下,利用标量磁强计读数对磁场矢量进行标量校正的数据处理方法。

矢量磁强计线性输出模型如下^[15]:

$$\mathbf{E} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{B}_{\text{VFM}} + \mathbf{b}. \quad (1)$$

式中, $\mathbf{B}_{\text{VFM}} = [B_x, B_y, B_z]^T$ (单位 nT) 为矢量磁强计处的真实磁场矢量, $\mathbf{E} = [E_x, E_y, E_z]^T$ (单位 nT) 为矢量磁强计输出磁场矢量, 矩阵 $\mathbf{S} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 为矢量磁强计的标度因子矩阵, 矩阵 $\mathbf{P} \in \mathbf{R}^{3 \times 3}$ 描述正交系下真实磁场矢量转换至矢量磁强计的非正交系下, $\mathbf{b} = [b_{x0}, b_{y0}, b_{z0}]^T$ (单位 nT) 描述矢量磁强计三轴固有偏差。

矢量磁强计的标度因子矩阵 $\mathbf{S}$ 为三轴灵敏度构成的对角阵形式, 不考虑轴间干扰, 可写为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & S_z \end{bmatrix}.$$

式中, S_x, S_y, S_z 分别为三轴标度因子, 三者均为接近 1 的常数(无量纲), 不考虑轴间串扰。

考虑到矢量磁强计机械轴不可能完全正交, 三轴非正交角定义如图 1 所示。 $Ox'y'z'$ 表示矢量磁强计测量磁场非正交坐标系, $Oxyz$ 为正交坐标系, U_1, U_2, U_3 表示正交系与非正交系之间的夹角, 三者均为小角度。非正交系坐标轴 x' 轴投影在 Oxy , Oxz 平面, 与 x 轴的夹角分别为非正交角 U_2, U_3 ; y' 轴与 y 轴的夹角为非正交角 U_1 ; z' 轴与正交系 z 轴重合。

描述矢量磁强计非正交性的矩阵可表示为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 1/w & \tan U_3/w & \tan U_2/w \\ 0 & \cos U_1 & \sin U_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式中, $w = \sqrt{1 + \tan^2 U_2 + \tan^2 U_3}$ 。

由式(1)~(2), 矢量磁强计处真实磁场为

$$\mathbf{B}_{\text{VFM}} = \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{S}^{-1} \cdot (\mathbf{E} - \mathbf{b}). \quad (3)$$

式中,

$$\mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} w & -\frac{\tan U_3}{\cos U_1} & \frac{\sin U_1 \tan U_3 - \cos U_1 \tan U_2}{\cos U_1} \\ 0 & \frac{1}{\cos U_1} & \arctan U_1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2 标量校正算法设计

针对以 SWARM 为代表的地磁测量卫星矢量磁强计与标量磁强计的安装特点以及工作原理进行校正算法设计。

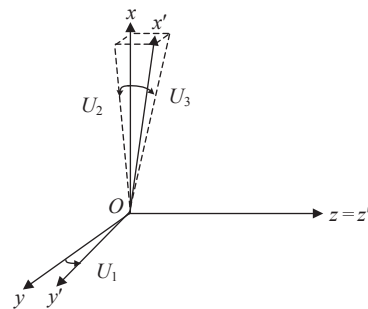


图 1 非正交角定义

Fig. 1 Definition of the non-orthogonalities

标量磁强计利用塞曼效应进行磁场测量,其测量值与磁场方向、温度和时间无关。而且,由于标量磁强计距离卫星本体较远且不受外界环境影响,可利用磁场标量测量值对矢量数据进行校正。

2.1 基于小量近似的线性校正算法

在矢量磁强计线性输出模型基础上,由于 U_1, U_2, U_3 均为小角度,式(3)可简化为^[16]

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/S_x & \cos a_{x'y'} & \cos a_{x'z'} \\ 0 & 1/S_y & \cos a_{y'z'} \\ 0 & 0 & 1/S_z \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{x0} \\ b_{y0} \\ b_{z0} \end{bmatrix} \right\}. \quad (4)$$

式中, $a_{x'y'}, a_{x'z'}, a_{y'z'}$ 表示传感器任意两轴间夹角。式(4)可记为

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 & k_3 \\ 0 & k_4 & k_5 \\ 0 & 0 & k_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x - b_{x0} \\ E_y - b_{y0} \\ E_z - b_{z0} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式中, $k_1 \sim k_6$ 为线性校正模型的校正系数。

矢量磁强计处的地磁场强度为

$$|B_{\text{VFM}}| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} = \{[k_1(E_x - b_{x0}) + k_2(E_y - b_{y0}) + k_3(E_z - b_{z0})]^2 + [k_4(E_y - b_{y0}) + k_5(E_z - b_{z0})]^2 + [k_6(E_z - b_{z0})]^2\}^{1/2}. \quad (6)$$

矢量磁强计三轴输出值为

$$E_{x,y,z} = B_{x,y,z} + \Delta B_{x,y,z}. \quad (7)$$

式中, $\Delta B_{x,y,z}$ 为矢量磁强计测量误差。由式(5)可进一步得到

$$\begin{cases} \Delta B_x = E_x - B_x = E_x - k_1(E_x - b_{x0}) - k_2(E_y - b_{y0}) - k_3(E_z - b_{z0}), \\ \Delta B_y = E_y - B_y = E_y - k_4(E_y - b_{y0}) - k_5(E_z - b_{z0}), \\ \Delta B_z = E_z - B_z = E_z - k_6(E_z - b_{z0}). \end{cases} \quad (8)$$

矢量磁强计与标量磁强计磁场测量的标量残差可表示为

$$\Delta F = |\mathbf{E}| - F_{\text{ASM}} = \frac{E_x}{F_{\text{ASM}}} \Delta B_x + \frac{E_y}{F_{\text{ASM}}} \Delta B_y + \frac{E_z}{F_{\text{ASM}}} \Delta B_z, \quad (9)$$

具体推导为

$$\begin{aligned} \Delta F &= |\mathbf{E}| - F_{\text{ASM}} = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} - \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} = \\ &= \frac{(E_x^2 - B_x^2) + (E_y^2 - B_y^2) + (E_z^2 - B_z^2)}{\sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} + \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}} = \\ &= \frac{[(E_x + B_x)(E_x - B_x) + (E_y + B_y)(E_y - B_y) + (E_z + B_z)(E_z - B_z)]}{\sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2} + \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}} \approx \\ &\approx \frac{E_x \Delta B_x + E_y \Delta B_y + E_z \Delta B_z}{F_{\text{ASM}}}. \end{aligned}$$

式中, F_{ASM} 为标量磁强计测量的磁场标量值, 具体表示为

$$F_{\text{ASM}} = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}.$$

将式(8)代入式(9)中, 标量残差可表示为矩阵形式

$$\Delta F = |\mathbf{E}| - F_{\text{ASM}} = \mathbf{k} \cdot \mathbf{M}. \quad (10)$$

式中, $\mathbf{k}$ 为待求校正参数矢量; $\mathbf{M}$ 为磁场数据矢量, 具体表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{k} &= (1 - k_1, 1 - k_4, 1 - k_6, -k_2, -k_3, -k_5, \\ &\quad k_1 b_{x0} + k_2 b_{y0} + k_3 b_{z0}, k_4 b_{y0} + k_5 b_{z0}, k_6 b_{z0}), \\ \mathbf{M} &= \left(\frac{E_x^2}{F_{\text{ASM}}}, \frac{E_y^2}{F_{\text{ASM}}}, \frac{E_z^2}{F_{\text{ASM}}}, \frac{E_x E_y}{F_{\text{ASM}}}, \frac{E_x E_z}{F_{\text{ASM}}}, \frac{E_y E_z}{F_{\text{ASM}}}, \frac{E_x}{F_{\text{ASM}}}, \frac{E_y}{F_{\text{ASM}}}, \frac{E_z}{F_{\text{ASM}}} \right)^T. \end{aligned}$$

针对上述线性模型采用迭代重加权最小二乘 (Iteratively Reweighted Least Squares, IRLS) 算法实现。损失函数定义为

$$f(\mathbf{k}^T) = \arg \min_{\mathbf{P}^T} (\Delta F^T - \mathbf{M}^T \mathbf{k}^T). \quad (11)$$

待求参数矢量为

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_{\text{new}}^T &= (\mathbf{M} \mathbf{W}_{\text{new}}^T \mathbf{W}_{\text{new}} \mathbf{M}^T + \lambda \mathbf{R})^{-1} \cdot \\ &\quad \mathbf{M} \mathbf{W}_{\text{new}}^T \mathbf{W}_{\text{new}} \Delta F^T. \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $\mathbf{k}_{\text{new}}^T$ 为迭代过程中更新的参数矢量; $\mathbf{W}_{\text{new}}$ 为权重矩阵, 具体表示为

$$\mathbf{W}_{\text{new}} = |\mathbf{M}^T \mathbf{k}_{\text{old}}^T - \Delta F^T|^{\frac{p-2}{2}};$$

$\mathbf{R}$ 为正则化项, 减少迭代过程中由于矩阵奇异造成结果不准确的情况。通过适当选取参数 p 、正则化项以及迭代次数, 实现损失函数的极小化。

2.2 基于参数辨识更新的非线性校正算法

基于参数辨识更新的非线性校正算法采用非线性

性最小二乘方法, 从极小化磁场标量残差的角度出发, 直接考虑非正交角、偏差以及标度因子矩阵对磁场测量的影响。相比线性校正算法中简化非正交性矩阵得到的线性校正模型, 非线性校正算法直接对矢量磁强计的误差参数进行辨识更新, 直接得到非正交角、偏差以及标度因子的校正结果。

由式(3)矢量磁强计处的磁场矢量, 得到磁场标量表达式为^[17]

$$B_{\text{VFM}} = |\mathbf{B}_{\text{VFM}}| = \sqrt{\mathbf{B}_{\text{VFM}}^T \cdot \mathbf{B}_{\text{VFM}}} = \sqrt{(\mathbf{E} - \mathbf{b})^T \cdot \mathbf{S}^{-1} \cdot (\mathbf{P}^{-1})^T \cdot \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{S}^{-1} \cdot (\mathbf{E} - \mathbf{b})}. \quad (13)$$

式中, 矢量磁强计标度因子、非正交角及偏差共 9 个参数, 可由参数矢量 $\mathbf{m}$ 表示, 有

$$\mathbf{m} = (b_{x0}, b_{y0}, b_{z0}, S_x, S_y, S_z, U_1, U_2, U_3)^T.$$

矢量磁强计与标量磁强计磁场测量的标量残差可以表示为

$$d(\mathbf{m}) = \sqrt{(\mathbf{E} - \mathbf{b})^T \cdot \mathbf{S}^{-1} \cdot (\mathbf{P}^{-1})^T \cdot \mathbf{P}^{-1} \cdot \mathbf{S}^{-1} \cdot (\mathbf{E} - \mathbf{b})} - F_{\text{ASM}}. \quad (14)$$

对于极小问题 $\min_{\mathbf{m} \in R^9} d(\mathbf{m})$, 采用 Gauss-Newton 方法进行求解。给定初始参数矢量 $\mathbf{m}_0$, 令 $k = 0, 1, \dots$, 计算

$$\mathbf{m}^{k+1} = \mathbf{m}^k + \delta \mathbf{m}^k, \quad (15)$$

$$\delta \mathbf{m}^k = [(\mathbf{G}^k)^T \cdot \mathbf{W}_d^k \cdot \mathbf{G}^k]^{-1} \cdot [(\mathbf{G}^k)^T \cdot \mathbf{W}_d^k \cdot \delta d^k]. \quad (16)$$

式中, δd^k 为第 k 次迭代的残差; $\mathbf{G}^k$ 为 Jacobi 矩阵; 权

重矩阵 $\mathbf{W}_d^k$ 在每次迭代中更新, 为对角阵形式。具体表示为

$$\delta d^k = F_{\text{ASM}} - B_{\text{VFM}}(\mathbf{E}, \mathbf{m}^k), \quad (17)$$

$$\mathbf{G}^k = \left. \frac{\partial d(\mathbf{m})}{\partial \mathbf{m}} \right|_{\mathbf{m}=\mathbf{m}^k}, \quad (18)$$

$${}^k w_i = |{}^k d_i|^{-1/2}. \quad (19)$$

式中 ${}^k w_i$ 为第 k 次迭代中权重矩阵的对角线元素, 取决于第 k 次迭代中每个样本点对应的残差量大小。

3 仿真校验

3.1 仿真数据模拟

由于目前国际上 SWARM 等卫星并未公开磁场探测的 0 级数据, 为验证本文算法的有效性, 为中国后续高精度地磁测量卫星磁场标定提供参考, 这里通过数学仿真的方式构造原始探测数据。由国际通用地磁场模型 IGRF13 系数以及磁位函数的球谐表达式, 建立地球磁场模型^[18]。地磁位的球谐函数表达式为

$$V = a \sum_{n=1}^{N'} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{n+1} (g_n^m \cos m\lambda + h_n^m \sin m\lambda) p_n^m(\cos \theta). \quad (20)$$

式中, a 为地球半径, r 为观测点离开地心的径向距离, θ 为地理余纬; λ 为东经; $P_n^m(\cos \theta)$ 为 n 阶 m 次的缔合勒让德函数; N' 取 14; g_n^m 和 h_n^m 为地磁场球谐系数。图 2 给出了全球地磁场仿真结果。

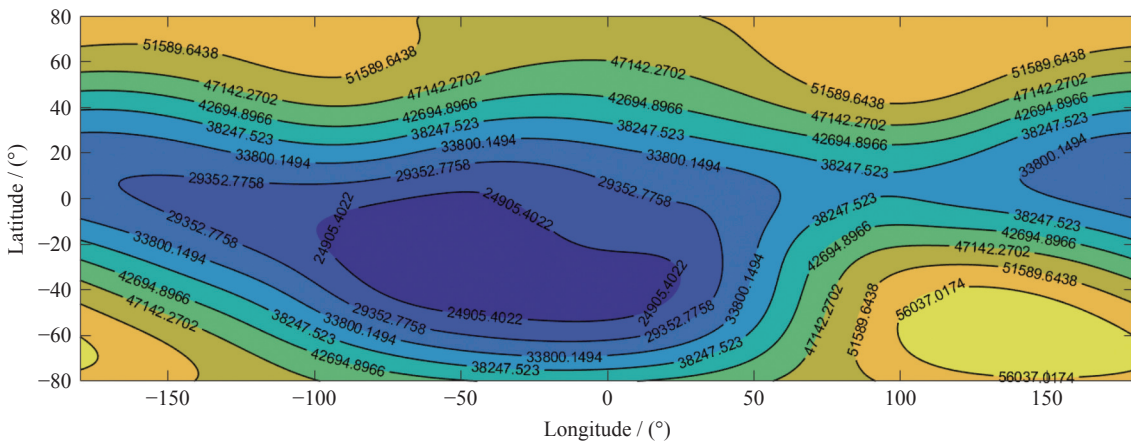


图 2 全球等强度地磁分布

Fig. 2 Global geomagnetic map of equal intensity

针对某地磁测量卫星,轨道高度 400 km,轨道倾角 87.357° ,升交点赤经 297.019° ,卫星轨道为圆轨道,考虑地球扁率摄动的影响。

假定标量磁强计与矢量磁强计初始采样频率均为 50 Hz,标量磁强计测量值的固定误差设置为 0.3 nT,其他仿真参数在表 1 中给出。卫星本体坐标系定义为: O 点位于卫星质心, Ox 轴在轨道平面内指向速度方向, Oz 轴指向地心, Oy 轴垂直于轨道平面

且与 Ox 和 Oz 轴构成右手坐标系。假设卫星本体系统与矢量磁强计坐标系重合。

3.2 标量校正算法对比

在上述初始参数给定的情况下,研究引入传感器误差后两种校正方法的有效性。将两种校正方法进行对比分析,在仿真中不考虑其他磁场干扰的影响。

卫星本体坐标系下的磁场仿真数据(共计 124000 组)如图 3 所示。从图 4 可以看出,传感器初

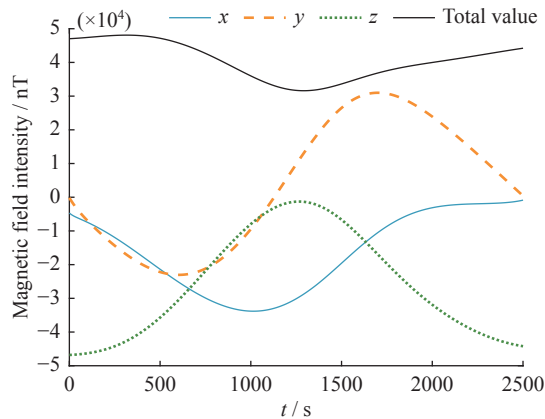


图 3 采样频率为 50 Hz 时的磁场仿真数据
Fig. 3 Magnetic field simulation data at sampling frequency of 50 Hz

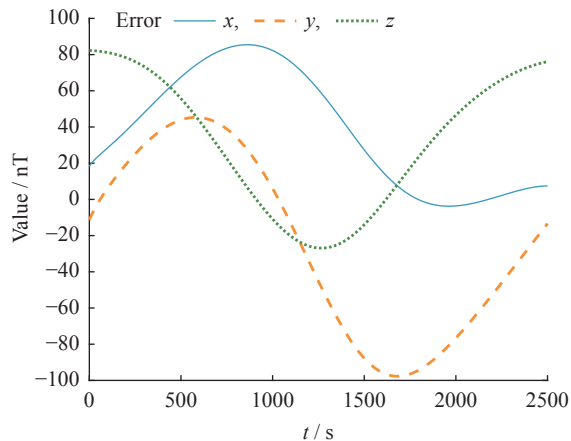


图 4 三轴初始测量误差
Fig. 4 Initial measurement errors of the three axes

表 1 不同情况下非线性校正算法参数辨识结果与初始参数对比

Table 1 Parameter identification results of the nonlinear correction algorithm in different cases compared with the initial parameters

仿真条件	固有偏差/nT	标度因子			非正交角/(°)		
		S_x	S_y	S_z	U_1	U_2	U_3
初始参数	$[10.00, 20.00, 30.00]^T$	1.002500	1.002600	1.002400	0.0100	0.0200	0.0300
无干扰	$[10.28, 20.13, 30.29]^T$	1.002499	1.002594	1.002399	0.0101	0.0204	0.0302
高斯白噪声 (幅值0.15 nT)	$[11.98, 20.91, 30.50]^T$	1.002549	1.002587	1.002404	0.0109	0.0222	0.0304
高斯白噪声 (幅值1 nT)	$[15.22, 19.82, 30.94]^T$	1.002645	1.002615	1.002416	0.0099	0.0243	0.0271
均匀分布噪声 (幅值0.5 nT)	$[11.93, 19.77, 30.31]^T$	1.002547	1.002599	1.002400	0.0097	0.0220	0.0286
周期性噪声 (幅值0.5 nT)	$[11.50, 20.29, 30.44]^T$	1.002535	1.002595	1.002403	0.0103	0.0215	0.0298
标量数据存在 2 nT异常扰动	$[10.42, 19.72, 30.23]^T$	1.002504	1.002598	1.002398	0.0097	0.0205	0.0295
标量数据存在10 nT 异常扰动(应用Tukey 权重函数后)	$[10.38, 20.15, 30.30]^T$	1.002503	1.002594	1.002400	0.0101	0.0204	0.0302

始参数设置带来的 x 轴磁场测量误差最高达 85 nT, y 轴误差最高达 98 nT, z 轴误差最高达 81 nT。

图 5 表明, 经线性校正算法校正后, 三轴误差在 ± 0.352 nT 范围内变化, 标量残差在 ± 0.0008 nT 范围内变化。图 6 表明, 经非线性算法校正后, 磁场三轴误差在 ± 0.341 nT 范围内变化, 标量残差在 ± 0.0007 nT 范围内变化。

对比两种算法的校正结果, 在考虑矢量磁强计非正交角、标度因子和偏差的影响下, 两种算法校正结果基本相同。

基于小量近似的线性校正算法通过更新磁场矢量数据和误差模型参数实现校正效果, 最终的辨识参数为校正后矢量磁场数据(误差 < 0.5 nT)对应的误差参数; 基于参数辨识更新的非线性校正算法通过不断

更新误差模型参数, 使其逼近磁场矢量测量数据对应的误差参数, 实现校正效果。

非线性校正后的传感器参数辨识结果列于表 1, 偏差量误差在 ± 0.23 nT 以内, 三轴标度因子误差保持在 ± 0.000006 nT 以内, 非正交角误差在 $\pm 0.0004^\circ$ 以内, 辨识后传感器参数均保持在较高精度。

3.3 噪声干扰情况下仿真对比

分析矢量磁强计不同形式测量噪声干扰对校正方法的精度影响。由于两种校正方法在噪声干扰情况下的校正结果相似, 因此这里给出了非线性方法的校正结果。

添加幅值为 0.15 nT 的高斯白噪声, 校正后三轴误差由于受矢量磁强计误差的限制, 其振荡幅值在 ± 0.6 nT 以内。标量残差受噪声影响较大, 其范围

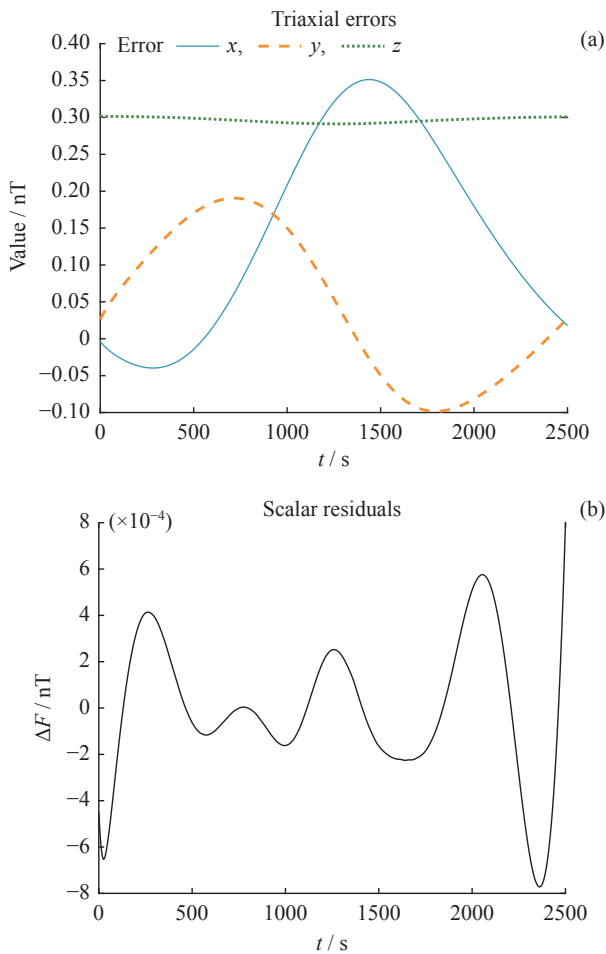


图 5 经线性模型校正后的磁场三轴误差变化曲线以及标量残差

Fig. 5 Magnetic field errors and scalar residuals after linear model correction

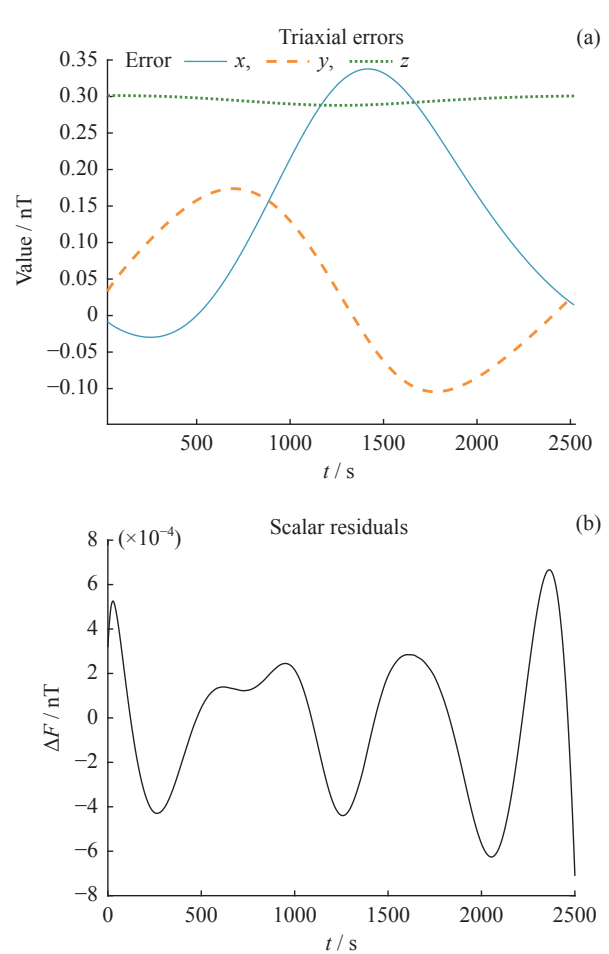


图 6 经非线性模型校正后的磁场三轴误差以及标量残差变化曲线

Fig. 6 Magnetic field errors and scalar residuals after nonlinear model correction

由 ± 0.0007 nT 增大至 ± 0.5 nT。添加幅值为 1 nT 的高斯白噪声, 三轴误差水平基本保持在 ± 2.5 nT 以内。对比图 7 和图 8 可以看出, 校正后三轴误差与标量残差的幅值均与噪声相关, 表明噪声对传感器误差造成了叠加影响, 标量残差受噪声影响较大。图 9 给出了矢量磁强计存在幅值为 0.5 nT 的均匀分布噪声和周期性噪声时, 经算法校正后的三轴误差。结果表明, 校正误差受噪声形式影响, 基本与噪声的幅值水平保持一致, 误差分布与噪声具体分布相关。结合表 1 不同形式的噪声干扰对比结果可以得出, 参数辨识结果仅与噪声幅值相关, 与噪声形式无关。

3.4 异常扰动情况下仿真对比

考虑标量磁强计测量过程中, 可能由于数据处理单元电压的瞬变导致测量结果中出现异常值^[19], 同时考虑该异常体现在标量磁场测量值的瞬间突变, 且无法通过数据预处理进行消除。这里针对磁场标量数据的异常扰动问题, 对线性和非线性校正算法的处理结果进行分析。

在标量数据中添加单次大小为 2 nT 的异常扰动, 该异常扰动由瞬间脉冲仿真实现, 矢量数据不受标量异常的影响。

由图 10 可以看出, 标量数据存在 2 nT 的异常扰动时, 对线性算法校正精度影响较大。考虑线性校正算法第 k 次迭代中利用 $k-1$ 次校正结果, 将异常值造成的误差反复迭代, 因此受标量数据异常值的影响较大。增大异常扰动至 5 nT, 非线性校正算法精度也受到影响。由于两种算法均通过最小化均方误差实现参数求解, 扩大了异常值带来的影响。为提高算法的鲁棒性, 将权重函数改进为 Tukey 权重^[20], 有

$$w_i(\delta_i) = \begin{cases} [1 - (|\delta_i|/\varepsilon)^2]^2, & |\delta_i| \leq \varepsilon; \\ 0, & |\delta_i| > \varepsilon. \end{cases} \quad (21)$$

式中, δ_i 为数据残差, ε 为定义异常值的削波函数。Tukey 权重函数通过削弱标量数据中异常值的权重, 提高算法的鲁棒性。数据中的异常值由削波函数 ε 体现, 当数据对应的拟合残差大于 ε 定义的阈值时, 则视

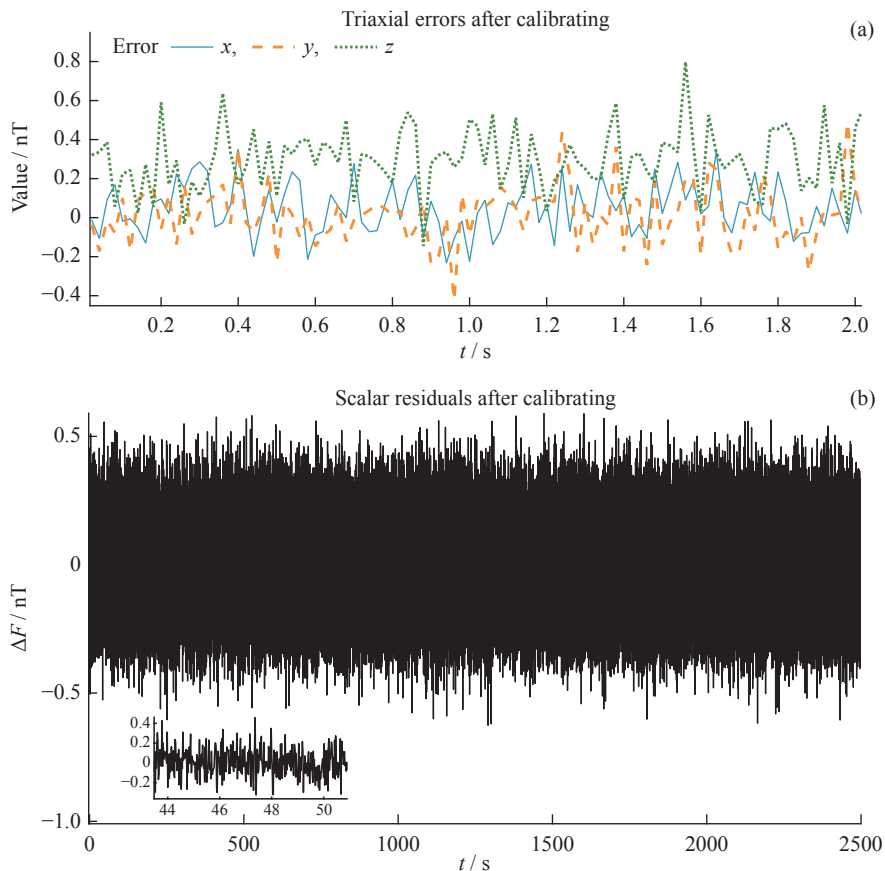


图 7 添加幅值为 0.15 nT 高斯白噪声干扰后的校正结果

Fig. 7 Calibrating results disturbed by Gaussian white noise which amplitude is 0.15 nT

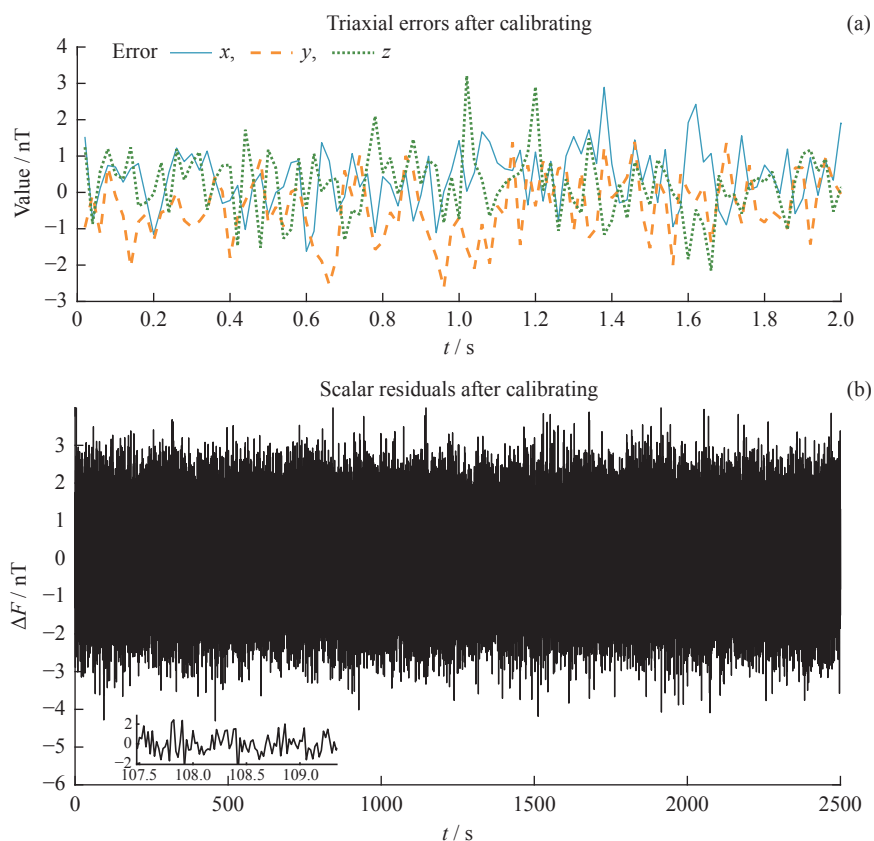


图 8 添加幅值为 1 nT 高斯白噪声干扰后的校正结果

Fig. 8 Calibrating results disturbed by Gaussian white noise which amplitude is 1 nT

为异常值。Tukey 权重函数使异常值处权重为 0, 不参与算法运算, 降低干扰。改进权重函数后, 标量数据添加 10 nT 的异常扰动, 两种校正算法的标量残差如图 11 所示, 两种算法基本不受异常值的影响。同时, 由表 1 非线性算法参数辨识结果可以看出, 权重函数的改进提高了非线性校正算法的参数辨识性能。这表明在应用 Tukey 权重函数有利于提高算法的抗干扰能力。

4 结论

针对地磁测量卫星矢量磁强计测量误差的在轨标定问题, 分别设计了基于小量近似的线性校正算法和基于参数辨识更新的非线性校正算法, 仿真了传感器误差影响下的磁场测量数据, 校验分析了两种磁场标定算法的效果。其中, 基于小量近似的线性校正算法在考虑矢量磁强计非正交角均为小量的基础上进行设计, 同时矢量磁强计的误差模型仅考虑非正交角、标度因子和偏差的影响, 因此线性校正算法的近

似是允许的。卫星在轨运行期间, 由于不确定性因素引起的建模误差, 对于小量近似的线性模型校正方法具有一定局限性。非线性校正算法从矢量磁强计误差模型参数辨识更新的角度出发, 通过求解矢量磁强计误差参数矢量的 Jacobi 矩阵实现磁场测量数据校正。相比线性校正算法, 基于参数辨识更新的非线性校正算法的参数扩展性更强, 更适用于复杂误差模型的磁场数据校正。

仿真结果表明, 在考虑矢量磁强计标度因子、偏差、小角度非正交角的影响且矢量磁强计测量噪声幅值低于 0.5 nT 的情况下, 两种算法校正后的三轴误差均在 0.5 nT 以内, 非线性校正的辨识参数与初始参数误差在合理范围内, 算法不受测量噪声的影响。同时, 将算法中关于残差的权重函数改进为 Tukey 权重函数提高了算法的鲁棒性, 适用于地磁测量卫星磁场探测数据的在轨标定。研究结果可为中国张衡一号、澳门科学一号等高精度地磁测量卫星数据处理提供参考。

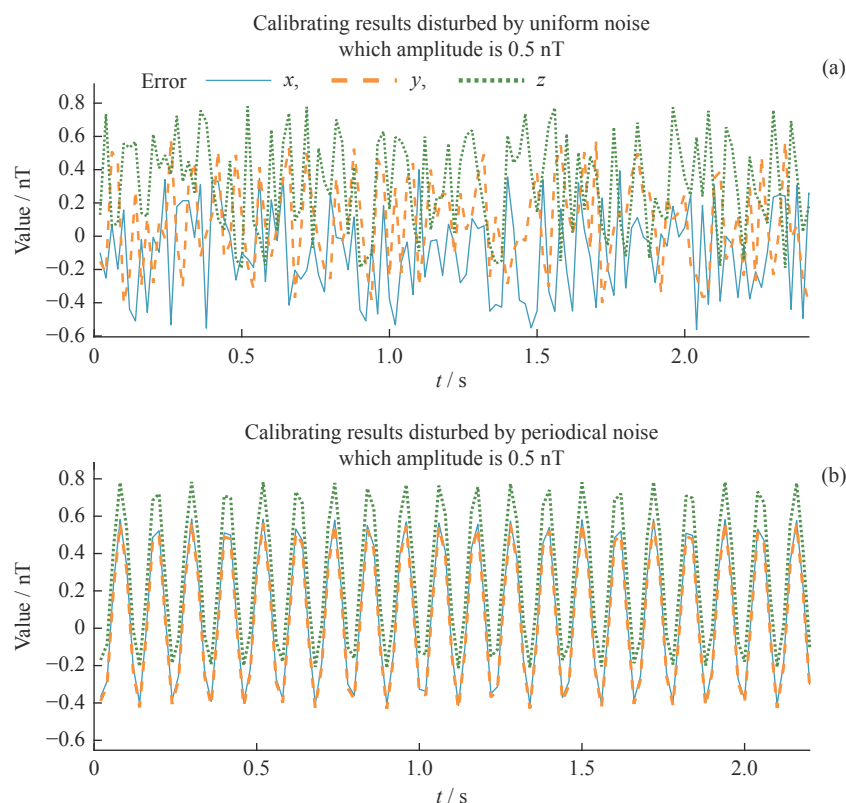


图9 添加幅值为 0.5 nT 均匀分布噪声和周期性噪声干扰后的校正结果

Fig. 9 Calibrating results disturbed by uniform noise and periodical noise which amplitude is 0.5 nT

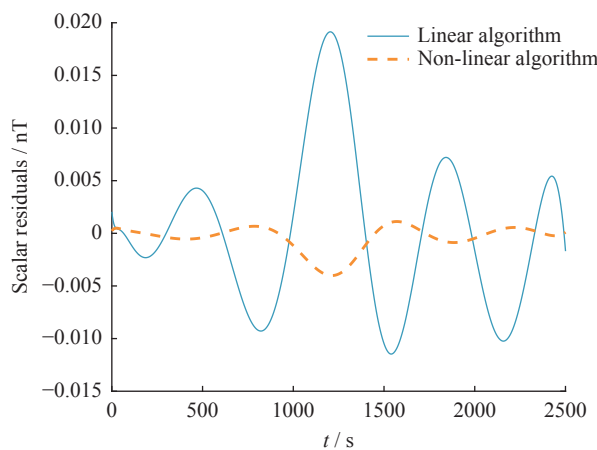


图10 标量数据中添加 2 nT 异常扰动后的校正结果

Fig. 10 Calibrating results of scalar data adding 2 nT anomaly perturbation

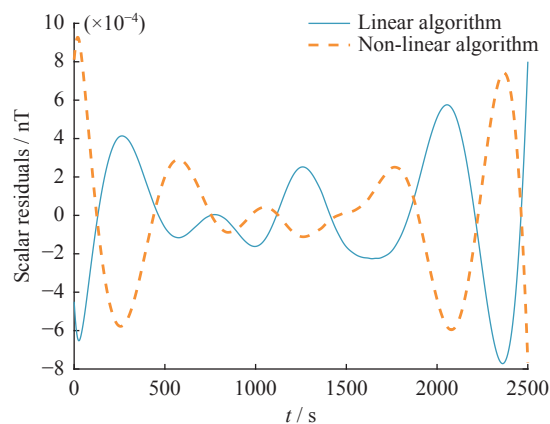


图11 标量数据中添加 10 nT 异常扰动后的校正结果

Fig. 11 Calibrating results of scalar data adding 10 nT anomaly perturbation

参考文献

- [1] ZUO Wenji, SONG Fuxiang. An approach to autonomous navigation using magnetic measurements for small satellites[J]. *Journal of Astronautics*, 2000, **21**(2): 100-104
- [2] WANG Shuyi, YANG Xu, YANG Di, *et al.* Algorithm for autonomous navigation of low earth orbit satellite using magnetic measurements[J]. *Journal of Astronautics*, 2003,

(左文辑, 宋福香. 微小卫星磁测自主导航方法[J]. 宇航学报, 2000, **21**(2): 100-104)

[2] WANG Shuyi, YANG Xu, YANG Di, *et al.* Algorithm for autonomous navigation of low earth orbit satellite using magnetic measurements[J]. *Journal of Astronautics*, 2003,

- 24(6): 634-637,660 (王淑一, 杨旭, 杨涤, 等. 近地卫星磁测自主导航算法研究[J]. 宇航学报, 2003, 24(6): 634-637,660)
- [3] ZHOU B, YANG Y Y, ZHANG Y T, *et al.* Magnetic field data processing methods of the China seismo-electromagnetic satellite[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2018, 2(6): 455-461
- [4] LIU Yikang, REN Shunqing, ZHANG Gaoxiong, *et al.* A calibration method for installation matrix between star sensor and magnetometer on the ground[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2021, 53(6): 34-40 (刘逸康, 任顺清, 张高雄, 等. 星敏与磁力仪间安装矩阵的一种地面标定方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(6): 34-40)
- [5] WANG Lanwei, HU Zhe, SHEN Xuhui, *et al.* Data processing methods and procedures of CSES satellite[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(S1): 39-55 (王兰伟, 胡哲, 申旭辉, 等. 电磁监测试验卫星(张衡一号)数据处理方法和流程[J]. 遥感学报, 2018, 22(S1): 39-55)
- [6] YU Xiangqian, LIU Si, XIAO Chijie, *et al.* Two-step calibration of tri-axial magnetometer based on ellipsoid fitting[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2021(4): 52-56 (于向前, 刘斯, 肖池阶, 等. 基于椭球拟合的三轴磁强计两步校准法[J]. 仪表技术与传感器, 2021(4): 52-56)
- [7] XIA Linlin, GENG Jingtong, XIAO Jianlei, *et al.* Ellipsoid fitting based two-step optimized correction for orthogonal tri-axis magnetic compass measurements[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2018, 26(4): 478-483 (夏琳琳, 耿靖童, 肖建磊, 等. 一种正交三轴磁罗盘的椭球拟合分步优化补偿方法(英文)[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(4): 478-483)
- [8] OLSEN N, ALBINI G, BOUFFARD J, *et al.* Magnetic observations from CryoSat-2: calibration and processing of satellite platform magnetometer data[J]. *Earth, Planets and Space*, 2020, 72(1): 48
- [9] HAMMER M D, FINLAY C C, OLSEN N. Applications for CryoSat-2 satellite magnetic data in studies of Earth's core field variations[J]. *Earth, Planets and Space*, 2021, 73(1): 73
- [10] ALKEN P, OLSEN N, FINLAY C C. Co-estimation of geomagnetic field and in-orbit fluxgate magnetometer calibration parameters[J]. *Earth, Planets and Space*, 2020, 72(1): 49
- [11] HERCEG M, JØRGENSEN P S, JØRGENSEN J L. Characterization and compensation of thermo-elastic instability of SWARM optical bench on Micro Advanced Stellar Compass attitude observations[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 137: 205-213
- [12] KLOSS C, FINLAY C C, OLSEN N. Co-estimating geomagnetic field and calibration parameters: modeling Earth's magnetic field with platform magnetometer data[J]. *Earth, Planets and Space*, 2021, 73(1): 23
- [13] ZHANG Zhenqi, LI Lei, ZHOU Bin, *et al.* A method of in-orbit calibration of fluxgate magnetometer based on the measurement of absolute scalar magnetometer[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, 34(2): 235-241 (张镇琦, 李磊, 周斌, 等. 基于绝对磁场测量的磁通门磁强计在轨标定方法[J]. 空间科学学报, 2014, 34(2): 235-241)
- [14] JØRGENSEN J L, JØRGENSEN P S, HERCEG M. Swarm μ ASC star tracker in-flight status and performance[EB/OL]. (2017-10-14)[2021-12-23]. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/swarm-%CE%BCasc-star-tracker-in-flight-status-and-performance>
- [15] QIN Geng, GUAN Xueyuan, LI Wensheng. Compensation method of magnetic field error of three dimensional vector based on ellipsoid compensation[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2018, 41(2): 37-40 (秦赓, 管雪元, 李文胜. 基于椭球补偿的三维载体磁场误差补偿方法[J]. 电子测量技术, 2018, 41(2): 37-40)
- [16] YIN F, LÜHR H. Recalibration of the CHAMP satellite magnetic field measurements[J]. *Measurement Science and Technology*, 2011, 22(5): 055101
- [17] TøFFNER-CLAUSEN L, LESUR V, OLSEN N, *et al.* In-flight scalar calibration and characterisation of the Swarm magnetometry package[J]. *Earth, Planets and Space*, 2016, 68(1): 129
- [18] CHEN Guifang, YU Feng, WANG Run. Geomagnetic reference map technology based on IGRF[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2020, 41(3): 98-104 (陈贵芳, 郁丰, 王润. 基于IGRF的地磁基准图技术[J]. 地震地磁观测与研究, 2020, 41(3): 98-104)
- [19] HU Ruifan. Design of Engineering Prototype for Digital Helium Optically Pumped Magnetometer[D]. Changchun: Jilin University, 2017 (胡睿帆. 数字式氦光泵磁力仪的工程样机设计[D]. 长春: 吉林大学, 2017)
- [20] BLACK M J, RANGARAJAN A. On the unification of line processes, outlier rejection, and robust statistics with applications in early vision[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1996, 19(1): 57-91