

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104199

地磁图数据随机误差建模与补偿*

牟 东¹ 青 泽¹ 赵军瑞² 廉 璞¹

(1. 中国工程物理研究院 电子工程研究所 绵阳 621999;
2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 北京 100191)

摘 要:地磁图是影响地磁匹配导航性能的重要因素,其中地磁图的随机误差严重影响匹配定位精度,甚至导致误匹配。为提高地磁匹配性能,提出了地磁图数据随机误差建模与补偿方法。该方法在对地磁图数据随机误差特性分析的基础上,建立数据的非平稳时间序列模型,并将此模型作为状态方程,以实时数据为量测量,采用 Kalman 滤波方法对地磁图数据进行滤波,补偿地磁图数据的随机误差。通过基于滤波前后地磁图数据的导航定位实验,间接证明滤波方法的有效性。对实际地磁图数据处理结果表明,应用该方法滤波后的地磁图数据进行导航,其定位精度提高了 54.7%。

关键词: 地磁图;随机误差;时间序列模型;Kalman 滤波

中图分类号: V241.5 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 学科分类代码:590.35

Random error modeling and compensating of geomagnetic map data

Mu Dong¹ Qing Ze¹ Zhao Junrui² Lian Pu¹

(1. Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China;
2. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics
and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract:Geomagnetic map is an important factor affecting the performance of geomagnetic matching navigation. The random errors of the geomagnetic map seriously affect the accuracy of the matching and positioning, even lead to mismatching. In order to improve the geomagnetic matching performance, a method for modeling and compensating the random errors of geomagnetic data is proposed. This method establishes a non-stationary time series model of the data based on the analysis of the random error characteristics of the geomagnetic map data, uses Kalman filter, which the state equation is the times series model and the measurement is the real-time data, to filter the geomagnetic map data and compensate the random error. The effectiveness of the filtering method is indirectly proved through the navigation and positioning experiments based on the geomagnetic data before and after filtering. The actual geomagnetic map data processing results show that the geomagnetic map data filtered by the method in this paper can improve the positioning accuracy by 54.7% when it's used for geomagnetic navigation.

Keywords: geomagnetic map; random error; time series model; Kalman filter

0 引 言

地磁匹配导航通过地磁传感器实时测量数据与地磁图中数据进行匹配实现定位,是一种实现自主导航的有效手段,在跨海跨平原等远程运载体导航定位领域有着

广泛的应用前景^[1-4]。地磁图构建是实现地磁匹配导航必需的一项关键技术^[5-6],而国际地磁参考场(international geomagnetic reference field,IGRF)等局部地磁场模型的精度无法满足精确导航定位的要求^[7]。由于地磁场数值比较大,而能反映位置变化的局域地磁场数据波动相对较小,因此,地磁匹配导航采用由去除国际地

磁参考场外的局域地磁异常场数据来构建地磁图,并用于匹配定位^[8]。其中,地磁图数据是应用磁测量系统实际测量的局域地磁异常数据经过插值等方法处理而得到^[9]。磁传感器测量误差和测试过程其他干扰因素会导致地磁测量数据出现误差。由于传感器和干扰的随机性,地磁图误差也表现为很强的随机性^[10-11]。这部分随机误差严重影响匹配定位精度,且给匹配定位算法带来了很大的困难^[12-14]。因此必须对构建地磁图的磁数据进行误差建模与补偿。地磁测量是对一个区域按照一定网格进行连续测量,因此地磁图数据可视为一维连续的随机序列。时间序列模型是进行随机误差建模的有效方法,在传感器随机误差建模方面已得到成功应用^[15],特别是自回归积分滑动平均(auto-regressive integrated moving average, ARIMA)模型在非平稳随机信号建模方面有着明显的优势^[16-17]。时间序列模型描述了地磁数据的统计规律,以此为基础采用 Kalman 滤波方法提取有用信号,可抑制噪声^[18-20]。采用软件建模与补偿方案对地磁图数据分析、建模和补偿,是一个成本低、见效快的办法。

基于以上技术背景,本文在对实测地磁图数据分析的基础上,研究基于时间序列模型和 Kalman 滤波的地磁图数据随机误差建模与滤波方法,并利用实际地磁图数据对研究方法进行验证。

1 非平稳随机信号建模方法

自回归与滑动平均(auto-regressive and moving average, ARMA)模型是对符合平稳性、正态性统计规律的数据的描述,而对于不符合平稳性、正态性条件的数据,在工程中通常利用差分法将数据平稳化,然后对平稳数据建立 ARMA 模型,再利用差分算子将 ARMA 模型转化为与原始非平稳数据对应的 ARIMA 模型。此 ARIMA 模型即反映了原始非平稳时间序列的统计特性。

设 ∇ 为差分算子, B 为移位算子,对非平稳时间序列 $\{x_k\}$ 进行一阶差分有:

$$\nabla x_k = x_k - x_{k-1} = (1 - B)x_k \quad (1)$$

式中: Bx_k 表示上一时刻的数据 x_{k-1} 。如果一阶差分后时间序列仍不平稳,可再次进行差分。通常进行 1 ~ 2 次差分后数据就能符合平稳性要求。对 $\{x_k\}$ 进行 d 阶差分后形成新的平稳时间序列 $\{z_k = \nabla^d x_k\}$ 。可对 $\{z_k\}$ 建立 $ARIMA(n, m)$ 模型:

$$z_k = \sum_{i=1}^n \varphi_i z_{k-i} - \sum_{j=1}^m \theta_j a_{k-j} + a_k, a_k \sim NID(0, \sigma_a^2) \quad (2)$$

式中: φ_i 称自回归系数; θ_j 称滑动平均系数; a_k 是模型噪声。将 d 阶差分算子作用于式(2),即用 $\{\nabla^d x_k\}$ 代替

$\{z_k\}$, 可得到原始数据的非平稳时间序列模型 $ARIMA(n, d, m)$:

$$\Phi(B) \nabla^d x_k = \Theta(B) a_k \quad (3)$$

式中: $\nabla^d = (1 - B)^d$, $\Phi(B) = 1 - \varphi_1 B - \dots - \varphi_n B^n$ 为平稳可逆 $ARIMA(n, m)$ 模型的自回归系数多项式; $\Theta(B) = 1 - \theta_1 B - \dots - \theta_m B^m$ 为平稳可逆 $ARIMA(n, m)$ 模型的滑动平均系数多项式。

ARIMA 模型建模流程如图 1 所示。

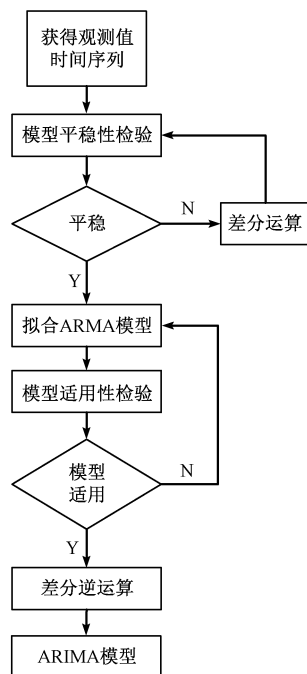


图 1 ARIMA 模型建模流程

Fig. 1 ARIMA model modeling process

图 1 中平稳性检验应用逆序法检验, ARMA 模型适用性检验用 BIC 检验准则。

2 平稳性和模型适用性检验方法

符合平稳性和正态性特点的数据才能建立 ARIMA 模型。因此,建模前需要对数据进行平稳性和正态性检验,通过可以建立 ARIMA,不通过则需要采用差分或其他方法对原始数据平稳化,然后对平稳数据建立 ARIMA 模型,再通过差分逆运算得到原始数据的时间序列模型。

2.1 平稳性检验方法

逆序检验法对具有单调趋势的时间序列平稳性检验是有效的,且便于在计算机上实现,是工程上常用的方法。

逆序检验法的检验方法是首先把 $\{x_k\}$ 分成 l 个子列,求出各子列的均值 μ_j ,然后把把这些值构成一个序列 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_l$ 。当 $i > j$ 时,每出现一次 $\mu_i > \mu_j$,定义为 μ_j

的一个逆序。对于某一 μ_j , 定义 μ_j 的逆序数 A_j 为 $\mu_i > \mu_j (i > j)$ 出现的次数, 所有的逆序数 A_j 的总和称为序列的逆序总数 A , 所有的逆序数 A_j 的平均值为 B , 所有的逆序数 A_j 的理论方差为 C 。按统计理论构造统计量:

$$u = \frac{A - B + 1/2}{\sqrt{C}} \quad (4)$$

这样构造的统计量 u 满足标准正态分布。因此, 当显著水平为 0.05 时, 如果 $|u| \leq 1.96$, 则可确定 μ_i 间无显著性差异, 可确定 $\{x_k\}$ 是平稳序列。

2.2 正态性检验方法

对 $\{x_k\}$ 的正态性检验, 最基本的检验方法是检验 $\{x_k\}$ 的三阶矩 (偏态系数 ξ) 和四阶矩 (峰态系数 γ) 是否满足正态随机变化的特性。偏态系数 ξ 反映了随机变量的概率密度函数峰的对称性, 峰态系数 γ 反映了随机变量的概率密度函数峰的状态。当 $\{x_k\}$ 满足 $\xi \approx 0, \gamma \approx 3$ 时, 可认为 $\{x_k\}$ 是正态序列。对 $\{x_k\}$ 、 ξ 和 γ 的计算值分别为:

$$\xi = \frac{1}{N\hat{\sigma}_x^3} \sum_{k=1}^N (x_k - \hat{\mu}_x)^3 \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{1}{N\hat{\sigma}_x^4} \sum_{k=1}^N (x_k - \hat{\mu}_x)^4 \quad (6)$$

式中: $\hat{\mu}_x$ 和 $\hat{\sigma}_x$ 分别是 $\{x_k\}$ 的均值和标准方差的估计值。

2.3 基于 BIC 准则模型适用性检验方法

建立的模型需要应用模型适用性准则来检验其所处理数据的有效性。其 BIC 准则简称贝斯信息准则, 是 Schwarz 提出的, 用于模型选择。当增加参数 k 的数量时, 就增加了模型的复杂度, 似然函数也会增大, 与 AIC 准则相比, BIC 准则选择更大的惩罚因子, 有效的解决了由于模型精度过高导致的复杂度也较高的问题。

BIC 准则为:

$$BIC = k \ln(n) - 2 \ln(L) \quad (7)$$

式中: k 是模型参数个数; n 是样本数量; L 是似然函数。 $k \ln(n)$ 惩罚项在维数过大且训练样本数据相对较少的情况下, 可以有效避免出现维度灾难现象。BIC 数值最小的模型是最佳模型, 此时的模型参数为最佳参数。

3 基于 ARIMA 模型的 Kalman 滤波设计

从系统上考虑, 地磁数据的随机误差是噪声驱动下的系统输出, 其输出数据可视为一随机序列, 时间序列模型反映了此时间序列的数据变化规律。因此, 可将反映地磁传感器数据关系的时间序列模型作为系统状态方程, 应用 Kalman 滤波方法对数据进行滤波。能快速滤除噪声, 保留信号的有效成份。

ARIMA 模型揭示了地磁数据序列中当前输出数据

与前面相邻几个数据间的关系。把此关系写为状态空间的形式, 即可作为 Kalman 滤波器的状态方程。根据 $ARIMA(n, d, m)$ 中的自回归系数的阶数 d 可确定系统状态向量 $\mathbf{X}_k = [x_k \ x_{k-1} \ \cdots \ x_{k-(n+d-1)}]^T$ 。再将磁传感器实时输出数据作为系统的量测量 $\mathbf{Z}_k$, 则量测系数可写为 $\mathbf{H} = [1 \ 0_{n+d-1}]$ 。因此, 可利用基于 ARIMA 模型的 Kalman 滤波器对磁传感器输出数据的随机误差进行滤波。

Kalman 滤波是一种能实现随机信号无偏最优估计的滤波方法。当激励源与系统输出响应的传递函数已知, 外界量测与被估计量间的函数也已知时, 应用 Kalman 滤波能有效滤除随机信号中的误差, 提取有用信号。Kalman 滤波的系统状态方程和量测方程可表示为:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \Phi \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{G} \mathbf{W}_k \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{H} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{V}_k \end{cases} \quad (8)$$

其中, $\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_1 & \Phi_2 & \cdots & \Phi_{n+d-1} & \Phi_{n+d} \\ & I_{n+d-1} & & & \mathbf{0} \end{bmatrix}$ 是系统状态

转移矩阵; I_{n+d-1} 单位阵; $\mathbf{G}$ 是系统噪声驱动阵; $\mathbf{W}_k$ 是系统噪声; $\mathbf{H}$ 是系统量测系数; $\mathbf{V}_k$ 是量测噪声。

4 地磁图数据统计特性分析与处理

4.1 地磁图数据统计特性分析与模型参数辨识

本文在对某地实际测量的地磁图数据分析基础上, 进行地磁数据随机误差建模与补偿方法研究与验证。实测地磁图如图 2 所示。

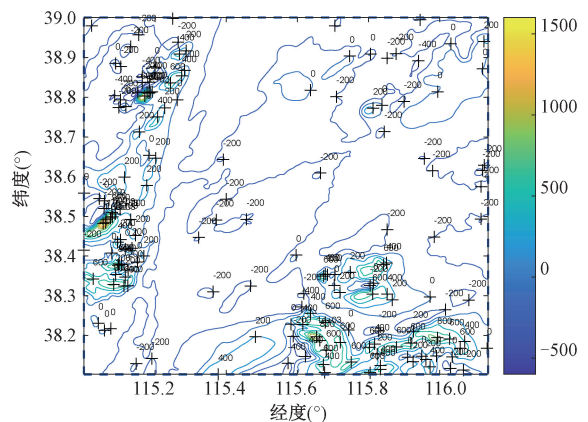


图 2 实测地面地磁图

Fig. 2 Measured ground geomagnetic map

地磁图是与经纬度有关的二维网格数据, 格点数据是按规划路线连续测量得到的, 因此可视为一维连续的随机序列。因此本文将二维网格数据按测量时间顺序重构为一维地磁测量序列, 对其进行分析处理后, 再还原为

地磁图二维网格数据。经平稳性检验,地磁测量序列是非平稳的。对数据进行差分后,利用第 1 节的非平稳随机信号建模方法,建立地磁测量序列的 ARIMA 模型。经处理,2 次差分后满足 ARIMA 模型条件,即原始地磁测量序列模型为 ARIMA(2,1,1)模型,其中参数表示自回归项数为 2、差分阶数为 1、滑动平均项数为 1。经 1 次差分后 ARIMA 模型参数分别为 $\phi_1 = -0.4178$ 、 $\phi_2 = -0.3517$,即为两项自回归项的系数,残差模型系数 $\theta = 0.002$ 。按式(3)可得原始非平稳序列的 ARIMA 模型为:

$$x_k - 0.5822x_{k-1} + 0.0661 - 0.3517x_{k-3} = 0.002\epsilon_t \quad (9)$$

式(9)表示地磁图随机序列的统计规律,可利用其地对地磁图数据进行滤波。

4.2 Kalman 滤波器

式(9)反映了地磁图数据的随机变化特性。其当前时刻数据变化与其前三个时刻的数据和当前时间的随机游走误差有关。可以选择 $\mathbf{X}_k = [x_k, x_{k-1}, x_{k-2}]^T$ 为状态变量,把式(9)表达为矩阵形式。

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} 0.5822 & 0.0661 & -0.3517 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{X}_{k-1} + \begin{bmatrix} 0.002 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{W}_k \quad (10)$$

式中: $\mathbf{X}_{k-1} = [x_{k-1}, x_{k-2}, x_{k-3}]$ 为前一时刻的状态变量; $\mathbf{W}_k$ 为随机游走误差。这样以式(10)为状态方程,则可以应用 Kalman 滤波方法对地磁图数据的随机误差进行滤波。

将当前地磁值作为观测量,得量测方程为:

$$\mathbf{Z}_k = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \mathbf{X}_k + 0.05\mathbf{V}_k \quad (11)$$

由于原始地磁测量序列随机误差系数为 0.05,模型残差系数为 0.002。所以式(10)与(11)中,选择系统噪声系数为 0.002,量测噪声系数为 0.05。

根据以上方程对地磁图数据进行处理,处理前后数据曲线如图 3 和 4 所示。图 3 是一维地磁测量序列进行滤波前后数据的对比;图 4 是滤波后地磁数据变化情况的等势线图。

图 3 中虚线为滤波前地磁测量序列,实线为滤波后地磁测量序列。由数据可以看出,滤波后曲线变得更加平滑,一些较小的噪声尖峰信号被滤除。与滤波前的地磁数据相比,滤波后地磁图变化情况如图 3 所示。由图 3 可以看出,滤波前后,在原地磁图等值线密集区域,滤波前后变化值较大,而等值线稀疏区域,滤波前后值变为较小。这表明在地磁场变化剧烈的区域,地磁测量误差对

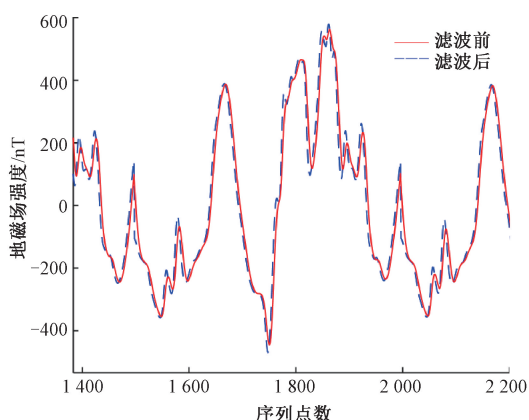


图 3 滤波前后部分地磁值(部分点数)

Fig. 3 Part of the geomagnetic value before and after filtering (partial points)

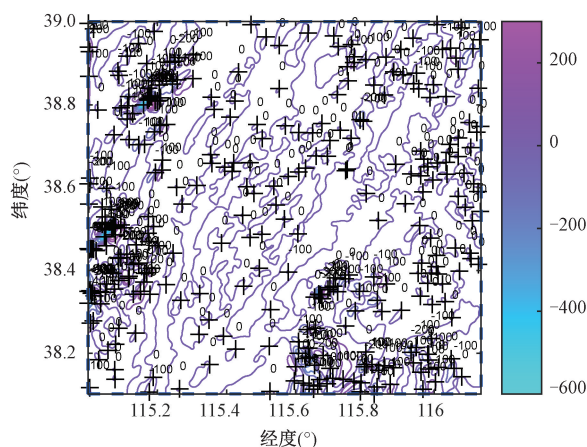


图 4 滤波前后地磁变化

Fig. 4 Geomagnetic changes before and after filtering

地磁图准确性的影响较大。

4.3 Kalman 滤波前后匹配性能分析

由 3.2 节数据可见,滤波对地磁图数据有影响,但由于没有真实地磁数据不能直接评估每点地磁数据的改进效果。本文通过利用滤波前后地磁图进行匹配导航精度对比来间接说明滤波对地磁图改进的效果。

选择图 2 所示实测地磁图作为原始地磁图。分别用原始地磁图和滤波后的地磁图作为地磁导航基准图,在惯性器件误差和运动轨迹相同情况下分别进行匹配定位,并对结果进行分析。

导航参数设置如下:

- 1) 惯导器件误差设置:陀螺漂移 $0.05^\circ/\text{h}$,加速度计偏置 $100 \mu\text{g}$ 。
- 2) 初始航向角误差 0.3° ,初始俯仰角误差 $20''$,初始横滚角误差 $20''$ 。
- 3) 地磁传感器误差:随机误差 10 nT ,常值误差 5 nT 。

4) 惯性器件输出频率为 100 Hz, 地磁传感器输出频率为 20 Hz。

5) 飞行航迹设置为北偏东 45° , 速度 3 400 m/s。仿真结果如图 5、6 所示。

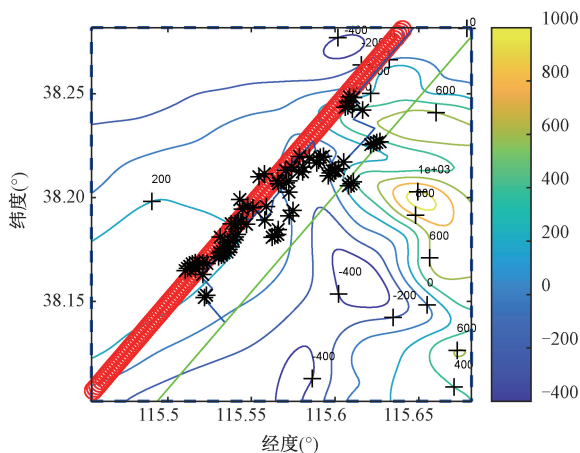


图 5 地磁图滤波前地磁导航定位结果

Fig. 5 Geomagnetic navigation and positioning results before geomagnetic map filtering

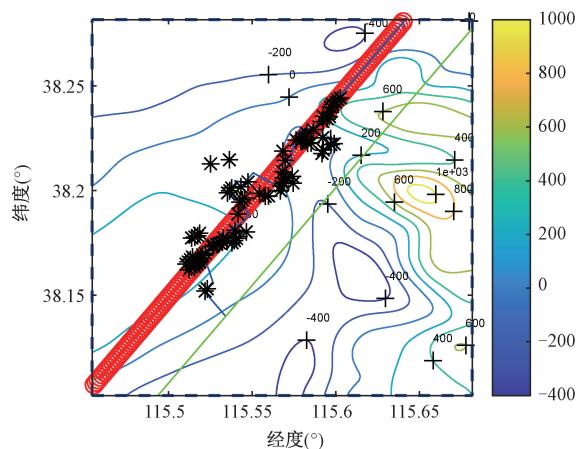


图 6 地磁图滤波后地磁导航定位结果

Fig. 6 Geomagnetic navigation and positioning results after geomagnetic map filtering

图 5、6 中 $\circ$ 是设定轨迹真值, $*$ 是匹配定位结果。对图 5 和 6 中数据进行定量计算结果为地磁图滤波前的导航定位精度 2 092.6 m, 地磁图滤波后的导航定位精度 946.2 m。对比两个结果可以看出, 地磁导航过程中测量器件误差相同的情况下, 对地磁图进行 ARIMA 滤波后, 依然可以使导航精度提高约 54.7%。

4.4 飞行数据处理

基于以上方法对一组飞行数据进行了处理。飞行试验方案是, 采用飞机实际测线建立实际地磁图, 并以此图为准图。把此图按上文所述方法进行滤波处理提到修

正随机误差的地磁图。在所建地磁图范围内飞行一条倾斜的航线, 并利用倾斜航线上对应的惯性导航系统数据、地磁传感器数据进行地磁匹配定位, 并利用卫星导航数据分别对匹配定位结果进行评价。从而对比分析地磁图滤波对匹配定位精度的影响。本文飞行试验中惯导系统中惯性器件输出频率为 100 Hz, 地磁传感器输出频率为 10 Hz。陀螺仪精度约为 $0.5^\circ/\text{h}$, 加速度计 $50 \mu\text{g}$ 。滤波前后地磁图匹配定位的结果和误差分别如图 7 ~ 10 所示。

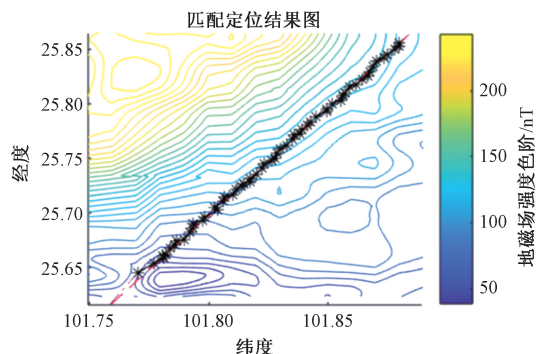


图 7 滤波前匹配定位结果

Fig. 7 Match positioning result before filtering

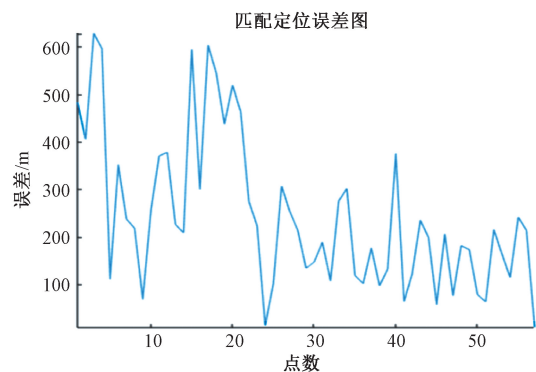


图 8 滤波前匹配定位误差

Fig. 8 Matching positioning error before filtering

由以上试验数据中, 利用没有补偿随机误差的地磁图进行匹配定位, 匹配定位精度是 225.47 m, 而利用滤波补偿后地磁图进行匹配滤波后的匹配定位精度是 199.83 m。滤波后对比两个结果可以看出, 地磁导航过程中测量器件误差相同的情况下, 对地磁图进行 ARIMA 滤波后, 可以使导航精度提高约 11.4%。

由以上数据分析可见, 对地磁图滤波抑制随机误差能有效提高匹配定位精度。

5 结 论

通过航空磁测等手段获取制作的地磁图中, 包含由

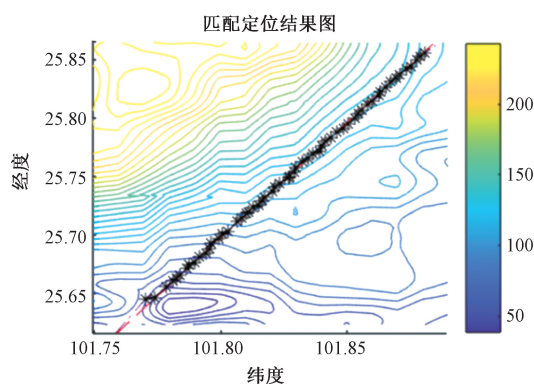


图9 滤波后匹配定位结果

Fig. 9 Match positioning result after filtering

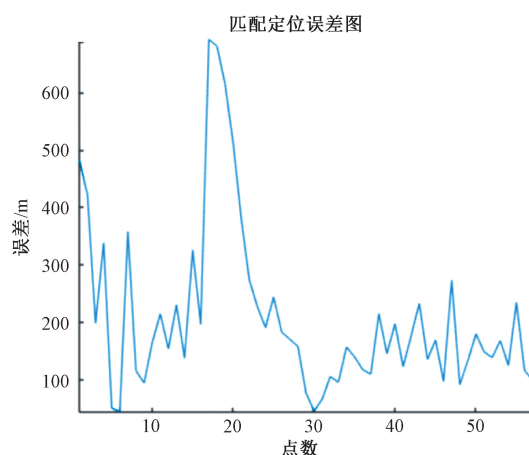


图10 滤波后匹配定位误差

Fig. 10 Matching positioning error after filtering

于地磁传感器误差导致的地磁图误差。通过使用ARIMA模型对地磁测量序列进行建模并构建出卡尔曼滤波后对原始地磁图进行滤波后,可以有效减少原始地磁图中包含的由传感器噪声导致的较小的尖峰噪声信号,从而提高了地磁导航基准图的可靠性,提高地磁导航精度。

参考文献

- [1] 周能兵,王亚斌,王强.地磁导航技术研究进展综述[J].导航定位学报,2018,6(2):15-19.
ZHOU N B, WANG Y B, WANG Q. A brief review of geomagnetic navigation technology [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2018, 6(2): 15-19.
- [2] 周军,葛致磊.地磁导航发展关键技术[J].宇航学报,2008,29(5):1467-1472.
ZHOU J, GE ZH L. Key technique and development for geomagnetic navigation [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(5): 1467-1472.
- [3] GOLDENBERG F. Geomagnetic navigation beyond the

magnetic compass [C]. 2006 Proceedings of the International Symposium on Position, Location and Navigation, IEEE, 2006: 684-694.

- [4] ZHAO J H, WANG SH P, WANG A X. Study on underwater navigation system based on geomagnetic match technique [C]. 2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, IEEE, 2009: 3-255-3-259.
- [5] 马啸宇,张金生,郝亮亮,等.基于压缩感知的高精度地磁基准图构建方法[J].北京航空航天大学学报,2020,46(4):791-797.
MA X Y, ZHANG J SH, HAO L L, et al. High-precision geomagnetic reference map construction method based on compressed sensing [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(4): 791-797.
- [6] 张聪聪,王新珩,董育宁.基于地磁场的室内定位和地图构建[J].仪器仪表学报,2015,36(1):181-186.
ZHANG C C, WANG X Y, DONG Y N. Simultaneous localization and mapping based on indoor magnetic anomalies [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(1): 181-186.
- [7] 常宜峰,种洋,柴洪洲,等.世界地磁场模型精度评价[J].武汉大学学报(信息科学版),2016,41(10):1398-1403.
CHANG Y F, ZHONG Y, CHAI H Z, et al. Evaluation of world magnetic model accuracy [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(10): 1398-1403.
- [8] 高金田,安振昌,顾左文,等.地磁正常场的选取与地磁异常场的计算[J].地球物理学报,2005(1):56-62.
GAO J T, AN ZH CH, GU Z W, et al. Selection of the geomagnetic normal field and calculation of the geomagnetic anomalous field [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005(1): 56-62.
- [9] 于运治,田茂均,姜璐.空间插值算法在构建海洋地磁图中的应用[J].舰船科学技术,2013,35(7):37-41.
YU Y ZH, TIAN M J, JIANG L. The application of spatial interpolation algorithm in marine geomagnetic mapping [J]. Ship Science and Technology, 2013, 35(7): 37-41.
- [10] 龙礼,张合.三轴地磁传感器误差的自适应校正方法[J].仪器仪表学报,2013,34(1):161-165.
LONG L, ZHANG H. Automatic and adaptive calibration method of tri-axial magnetometer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1): 161-165.
- [11] 李季,潘孟春,罗诗途,等.半参数模型在载体干扰磁场补偿中的应用研究[J].仪器仪表学报,2013,

- 34(9): 2147-2152.
- LI J, PAN M CH, LUO SH T, et al. Study on the application of semi-parametric model in vehicle interferential magnetic field compensation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34 (9): 2147-2152.
- [12] 朱占龙. 惯性/地磁匹配组合导航相关技术研究[D]. 南京:东南大学, 2015.
- ZHU ZH L. Research on related technologies of INS/geomagnetic matching integrated navigation [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [13] 杨云涛. 导航定位中地磁测量误差补偿技术研究[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(11): 125-128.
- YANG Y T. Research on geomagnetic measurement error compensation in navigation and localization [J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(11): 125-128.
- [14] 肖晶, 段修生, 齐晓慧. 一种基于概率数据关联的地磁匹配 ICCP 算法[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(2): 202-208.
- XIAO J, DUAN X, QI X. Iterated closest contour point algorithm for geomagnetic matching based on probability data association [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018, 26(2): 202-208.
- [15] 高文超, 卢道华, 李春林. 基于时间序列建模的陀螺仪随机误差分析[J]. 机械工程师, 2016(11): 4-7.
- GAO W CH, LU D H, LI CH L. Analysis of gyroscope random error based on time-serial modeling [J]. Mechanical Engineer, 2016(11): 4-7.
- [16] ZHU X, MOU D, LI M, et al. Modeling and compensation for dynamic random error of accelerometer under mooring state [C]. 2019 IEEE 3rd Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC). IEEE, 2019: 1030-1033.
- [17] 张瑞国, 李春雨, 丁志宏, 等. 基于时间序列模型的雷达数据随机误差建模与补偿[J]. 现代雷达, 2016, 38(11): 49-52.
- ZHANG R G, LI CH Y, DING ZH H, et al. Modeling and compensation of Radar Data Random Error Based on the Time-series Model [J]. Modern Radar, 2016, 38(11): 49-52.
- [18] 张延顺, 房建成. 小型动调陀螺随机误差建模与滤波方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28 (7): 1286-1289.
- ZHANG Y SH, FANG J CH. Research on random error modeling and filtering method for dynamically tuned gyroscope[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(7): 1286-1289.
- [19] 周俊, 张鹏, 刘成良. 基于时间序列分析的卡尔曼滤波组合导航算法[J]. 农业工程学报, 2010, 26(12): 254-258.
- ZHOU J, ZHANG P, LIU CH L. Kalman filtering for integrated navigation based on time series analysis [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(12): 254-258.
- [20] 王辛望, 沈小林, 刘新生. 基于自适应 Kalman 滤波的 MEMS 陀螺随机误差分析[J]. 传感技术学报, 2017, 30(11): 1666-1670.
- WANG X W, SHEN X L, LIU X SH. Random error analysis of MEMS gyroscope based on adaptive Kalman filter [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(11): 1666-1670.

作者简介



牟东, 2007 年于西安交通大学获得学士学位, 2010 年于西安交通大学获得硕士学位, 现为中国工程物理研究院电子工程研究所助理研究员, 主要研究方向为制导弹药设计。

E-mail: md1015@126.com

Mu Dong received his B. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2007, M. Sc. degree from Xi'an Jiaotong University in 2010. Now he is an assistant researcher at Institute of Electronic Engineering of China Academy of Engineering Physics. His main research interest includes the design of guided munitions.