

基于 AUV 晃动平台的水下磁性目标定位

马剑飞¹, 丁 凯², 颜 冰¹, 林春生¹

(1. 海军工程大学兵器工程学院, 湖北武汉 430033; 2. 近地面探测技术重点实验室, 江苏无锡 214035)

摘 要: 针对传统磁梯度张量方法定位精度易受运动载体平台晃动影响的问题, 本文提出了一种基于十字形磁梯度张量系统结构的磁梯度张量特征值不变量定位方法, 该算法有效克服了载体平台晃动对定位精度带来的影响, 并进一步分析了影响该算法定位性能的因素. 相比于三阶张量定位算法与多点测量线性定位算法, 本文算法的代价在于 AUV (Autonomous Underwater Vehicle) 载体平台必须要有一次上升或下潜动作. 仿真实验结果表明: 在无环境磁干扰和平台无晃动的理想情况下, 本文算法的定位精度仅次于欧拉定位法, 当存在环境磁干扰时, 欧拉法定位性能迅速恶化; 相比于三阶张量定位算法和多点测量线性定位算法, 无论环境磁干扰有无以及晃动角度多大, 本文定位算法的性能皆优于两者, 即使当运动载体平台晃动角度增加到 10° 时, 本文算法的最大定位误差也不超过 15m.

关键词: 电磁学; 晃动载体平台; 磁性目标定位; 磁梯度张量; 特征值不变量

中图分类号: U666.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2021)06-1088-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20200312

Underwater Magnetic Target Localization Based on Swaying AUV Platform

MA Jian-fei¹, DING Kai², YAN Bing¹, LIN Chun-sheng¹

(1. College of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan, Hubei 430033, China;

2. Science and Technology on Near-Surface Detection Laboratory, Wuxi, Jiangsu 214035, China)

Abstract: Considering that the localization accuracy of the traditional magnetic gradient tensor method is easily affected by the swaying of the moving carrier platform, we propose an improved localization method based on the eigenvalue invariant of the magnetic gradient tensor. The proposed method can overcome the effects on the location accuracy caused by the swaying of the carrier platform, and the factors which would affect the localization performance are analyzed as well. Compared with the third-order tensor localization method and the multi-point linear localization method, the cost of the proposed method is that a rising or diving action of the AUV (Autonomous Underwater Vehicle) platform is needed. The simulation results show that the localization accuracy of the proposed method is close to that of Euler localization method when no environmental magnetic interference and no swaying of the platform exist. However, the localization performance of Euler method would deteriorate rapidly when some environmental magnetic interference exists. Compared with the third-order tensor localization algorithm and the multi-point linear localization algorithm, the performance of the proposed method is better, regardless of the magnetic interference or the swaying magnitude. The maximum localization error of the proposed method is no more than 15m, despite the swaying of the moving platform is increased to 10° .

Key words: electromagnetics; swaying carrier platform; localization of magnetic target; magnetic gradient tensor; eigenvalue invariant

1 引言

相比于直接测量目标的磁场值, 磁梯度张量信息可以克服地磁场波动的影响, 其测量信息包括 5 个独立变

量, 可以更加全面地反映磁场细节等突出的优势. 目前, 基于磁梯度张量的探测技术逐步成为磁探测领域的研究热点, 德国、美国、澳大利亚等国家已开发出了磁梯度张量探测系统, 并开展了对应的航空探测试验^[1-4].

相对于航空磁探,以 AUV 作为载体平台的磁梯度张量系统可以在更近的距离对目标进行探测,因而测量信号具有更高的信噪比,可用于水下掩埋目标探测、港口安全防护等军事用途,特别是在浅海或者声学特性较为复杂的海洋环境下,磁梯度探测相对于声探测更为有效^[5].在具体应用方面,美国海军研究中心(ONR)对 Bluefin 12 型 UUV 搭载的 UUV-RTG 磁梯度张量系统的定位性能进行了评估^[6],新加坡的 DSO 国家实验室对其开发的 AUV 进行了磁梯度张量补偿研究,并利用反演的方法进行了目标的定位研究^[6,7].

在磁定位算法方面,传统的欧拉定位方法需要测量目标的三轴磁场,然而磁场测量平台的轻微晃动以及环境磁干扰皆会导致磁性目标定位存在很大的偏差,而且在磁张量奇异面附近磁张量矩阵近似为奇异阵,此时欧拉定位方法会失效^[8].张光等^[9]提出的运动平台的多点测量定位方法利用多空间点的磁梯度张量进行探测定位,可以弥补欧拉定位方法的不足,但是该定位方法需要利用智能优化算法求解非线性方程组,其计算过程复杂且实时性不强.于振涛等^[10]根据欧拉定位方程的微分形式,研究了利用运动平台 3 个连续观测点的磁梯度张量实现静态磁性目标的实时定位的方法其定位方法计算过程简洁,不要求解非线性方程组,可以实现磁性目标的实时定位.迟铨等^[11]根据平面阵列的多点磁梯度张量对应的特征值不变量与特征向量信息构建线性方程组,实现了对磁性目标的实时定位.上述方法通过多点的磁梯度测量实现磁性目标定位,相比于欧拉定位方法,在载体平台晃动以及存在环境磁干扰的情况下,其定位精度有所提高,但载体平台晃动对磁性目标定位结果仍有较大的影响.

文献[12,13]利用八个矢量磁传感器组成六面体结构,并根据磁梯度张量不变量对磁性目标进行定位,但六面体结构的体积较大,不适于搭载在 AUV 这种小型平台上,而且其传感器数量较多导致磁梯度张量的系统误差以及载体平台误差补偿存在一定困难,另外该算法也不能完全消除平台晃动带来的影响.

本文的磁梯度测量系统选用采用十字形结构,基于多点磁梯度张量的特征值不变量构建线性方程组,有效克服了载体平台晃动对磁性目标定位的影响.

2 传统的磁梯度张量定位

2.1 欧拉定位法

当探测距离大于 2.5 倍磁性目标长度时,磁性目标可以视为一个磁偶极子^[14],此时距离磁性目标 r 处的磁场矢量可以表示为

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

式中,对 \mathbf{B} 的三分量分别在 x 、 y 和 z 三个方向求偏导,可得到磁梯度张量 \mathbf{G} 为

$$\mathbf{G} = \nabla \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \partial B_x / \partial x & \partial B_x / \partial y & \partial B_x / \partial z \\ \partial B_y / \partial x & \partial B_y / \partial y & \partial B_y / \partial z \\ \partial B_z / \partial x & \partial B_z / \partial y & \partial B_z / \partial z \end{bmatrix} \quad (2)$$

在没有空间电流密度的观测区域,磁场的散度和旋度皆为 0,磁梯度张量 \mathbf{G} 为对称矩阵且其中包含 5 个独立量.根据磁梯度张量信息的欧拉定位公式^[15],测量系统与磁性目标的距离 r 可由磁场矢量 \mathbf{B} 与磁梯度张量 \mathbf{G} 反演得到

$$r = -3\mathbf{G}^{-1}\mathbf{B} \quad (3)$$

受环境磁信号干扰,磁场矢量 \mathbf{B} 与目标产生的磁场会存在一定的偏差.特别是当载体平台晃动时, \mathbf{B} 受地磁场的影响会产生很大的偏差.所以,磁性目标欧拉定位算法性能易受环境干扰且抗晃动能力较差,不适用于作为动平台的磁性目标定位算法.

2.2 三阶张量定位算法

文献[10]假定 AUV 平台在短时间内做匀速平动,根据欧拉定位方程的微分的形式以及磁梯度三阶张量的对称性,建立了基于三个连续观测点磁梯度张量的磁性目标定位公式

$$r_i = -8(\mathbf{G}(r_{i+1}) - \mathbf{G}(r_{i-1}))^{-1} \cdot (\mathbf{G}(r_i) \cdot \Delta \mathbf{r}) \quad (4)$$

式中, $\mathbf{G}(r_{i-1})$ 、 $\mathbf{G}(r_i)$ 、 $\mathbf{G}(r_{i+1})$ 分别为 $i-1$ 时刻、 i 时刻以及 $i+1$ 时刻的磁梯度张量, $\Delta \mathbf{r} = (\mathbf{r}_{i+1} - \mathbf{r}_{i-1})/2$.此定位算法相比于欧拉法能够克服环境磁场的干扰,利用载体平台的 3 个连续磁梯度张量测量值和载体平台的平动参数,可实时求出载体平台相对磁性目标的位置,进而实现对磁性目标的定位.然而当载体平台晃动时,磁梯度张量 \mathbf{G} 也会受到一定的影响,式(4)是基于三个连续观测点磁梯度张量进行反演定位,此时磁性目标定位结果存在较大的误差.

2.3 多点测量线性定位算法

文献[11]提出的多点测量线性定位算法主要基于以下两点:(1)磁梯度张量不变量与距离矢量存在确定的代数关系;(2)磁梯度张量 \mathbf{G} 绝对值最小的特征值对应的特征向量 \mathbf{c} 与距离矢量垂直.根据连续三个点的上述几何关系,作者构建线性方程组并实现了对磁性目标的实时定位.在载体平台存在晃动时,条件 1 是由磁梯度张量不变量导出的几何关系,其不受载体平台晃动影响,然而条件 2 不具备旋转不变量的性质,所以多点测量线性定位算法仍不能实现在载体平台晃动时的可靠定位.

3 磁梯度张量特征值不变量定位算法

3.1 特征值不变量

磁梯度张量不变量是对磁梯度张量进行一定的运

算得到一些不随坐标转换而变化的标量,常见的不变量有磁梯度张量的迹、模、特征值等^[11]. 根据文献[16], 磁梯度张量 \mathbf{G} 的特征值可表示为

$$\begin{cases} \lambda_1 = \frac{3\mu_0 m}{8\pi r^4} (-\cos\beta + \sqrt{4 + 5 \cos^2\beta}) \\ \lambda_2 = \frac{3\mu_0 m}{4\pi r^4} \cos\beta \\ \lambda_3 = \frac{3\mu_0 m}{8\pi r^4} (-\cos\beta - \sqrt{4 + 5 \cos^2\beta}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, μ_0 是真空磁导率, β 是目标磁矩 \mathbf{m} 与距离矢量 \mathbf{r} 的夹角, m 是目标磁矩 \mathbf{m} 的模值, r 是距离矢量 \mathbf{r} 的模值. 由上式可知磁梯度张量特征值是不变量, 进一步可构建一个与 β 无关的特征值不变量

$$u = (-\lambda_2^2 - \lambda_1\lambda_3)^{\frac{1}{4}} = \frac{1}{r^2} \sqrt{\frac{3\mu_0 m}{4\pi}} \quad (6)$$

在运动载体平台定位静止磁性目标应用中, m 是一个常数, 所以特征值不变量 u 仅与距离矢量的模值 r 相关, 不受载体平台晃动影响.

3.2 磁梯度张量特征值不变量定位算法

文献[17]对常见的磁梯度张量系统结构磁张量测量的效果进行了对比分析, 包括十字形结构、正方形结构、三角形结构、正四面体结构、正六面体结构等, 并指出十字形的测量结构最优, 本文选择十字形结构进行磁梯度张量测量, 十字形磁梯度张量系统由四个磁通门传感器组成, 其结构如图1所示, 其中 x 轴与 AUV 平台的轴线重合并指向 AUV 平台的艏部, y 轴指向右舷, z 轴竖直向下.

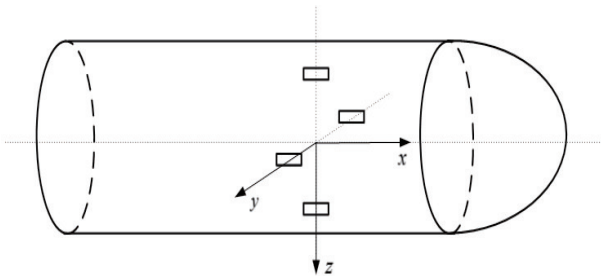


图1 十字形磁梯度张量系统结构

设磁性目标的坐标为 (x_0, y_0, z_0) , 磁梯度张量连续测量点坐标为 (x_k, y_k, z_k) , 则测量时刻 k 的特征值不变量可表示为

$$u_k = \frac{\sqrt{\frac{3\mu_0 m}{4\pi}}}{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2 + (z_k - z_0)^2} \quad (7)$$

进一步, 连续测量点的测量方程可表示为

$$\mathbf{A}\mathbf{V} = \mathbf{C} \quad (8)$$

其中

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1, & u_1, & u_1 x_1, & u_1 y_1, & u_1 z_1 \\ 1, & u_2, & u_2 x_2, & u_2 y_2, & u_2 z_2 \\ \vdots & & & & \vdots \\ 1, & u_5, & u_5 x_5, & u_5 y_5, & u_5 z_5 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3\mu_0 m}{4\pi}} \\ -x_0^2 - y_0^2 - z_0^2 \\ 2x_0 \\ 2y_0 \\ 2z_0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} u_1 (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2) \\ u_2 (x_2^2 + y_2^2 + z_2^2) \\ \vdots \\ u_5 (x_5^2 + y_5^2 + z_5^2) \end{bmatrix}$$

不难看出, AUV 平台在 x 方向、 y 方向以及 z 方向皆存在位移是 \mathbf{A} 可逆的必要条件. 然而在 AUV 平台实际的测量过程中, x 方向和 z 方向存在位移的条件是容易满足的, 但 y 方向位移则需要 AUV 平台发生转动, 连续的定位计算则需要平台频繁转动以及摆正到原来的航向, 导致 AUV 平台的动力系统负担加重. 另外, 受地磁场影响, 当平台一直保持平动状态时, 可以较好地补偿感应磁场对磁梯度张量的影响; 当平台转动后, 则需要平台稳定时才能进行有效地补偿感应磁场对磁梯度张量的影响, 从而导致一条测线上有效的观测点减少.

由式(8)可知, 向量 \mathbf{V} 的独立变量个数为 4, 因此重新构造式(8)可得

$$\mathbf{A}_t \mathbf{V}_t = \mathbf{C}_t \quad (9)$$

其中

$$\mathbf{A}_t = \begin{bmatrix} 1, & u_1, & u_1 x_1, & u_1 z_1 \\ 1, & u_2, & u_2 x_2, & u_2 z_2 \\ 1, & u_3, & u_3 x_3, & u_3 z_3 \\ 1, & u_4, & u_4 x_4, & u_4 z_4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{V}_t = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3\mu_0 m}{4\pi}} \\ -x_0^2 - y_0^2 - z_0^2 \\ 2x_0 \\ 2z_0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_t = \begin{bmatrix} u_1 (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2) \\ u_2 (x_2^2 + y_2^2 + z_2^2) \\ u_3 (x_3^2 + y_3^2 + z_3^2) \\ u_4 (x_4^2 + y_4^2 + z_4^2) \end{bmatrix}$$

设 (x_3, y_3, z_3) 为 AUV 平台的坐标原点, 系统采样间

隔为 T_s , 在测量点 1 到测量点 3 的区间内, AUV 平台匀速平动, x 方向的运动速度为 v_x , z 方向速度为 0; 在测量点 3 到测量点 4 的区间内, AUV 平台仍进行匀速平动, x 方向的运动速度为 v_x , z 方向速度为 v_z . 此时, 测量矩阵 A_i 可表示为

$$A_i = \begin{bmatrix} 1, & u_1, & -2u_1v_xT_s, & 0 \\ 1, & u_2, & -u_2v_xT_s, & 0 \\ 1, & u_3, & 0, & 0 \\ 1, & u_4, & u_4v_xT_s, & u_4v_zT_s \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)即可求解得到 V_t , 即 $x_0 = V_t(3)/2, z_0 = V_t(4)/2, |y_0| = \sqrt{-V_t(2) - x_0^2 - z_0^2}$. y_0 的正负可由 1.2 节中的三阶张量定位算法确定.

4 仿真实验

仿真实验利用 AUV 载体平台定位静止磁性目标, 磁梯度张量测量系统固定在载体平台上, x 轴与 AUV 平台的轴线重合并指向 AUV 平台的艏部, y 轴指向右舷, z 轴竖直向下. 仿真条件设置为: 磁梯度张量测量系统基线 L 为 0.5m; 采样频率 f_s 为 1Hz; 磁性目标磁矩 m 为 $(4, 3, 2) \times 10^5 \text{ Am}^2$; 初始时刻目标的位置为 $(200, 50, 50) \text{ m}$; AUV 平台 x 方向运动速度 v_x 为 5m/s, z 方向运动速度 v_z 为 1m/s; 磁传感器测量精度为 0.01nT; 环境磁干扰 n 服从均值为 0nT, 方差为 1 的高斯分布; 载体平台方位角、横滚角以及俯仰角的晃动都服从均值为 0° , 方差为 σ^2 的高斯分布; 地磁场矢量为 B_e 为 $(40, 20, 5) \mu\text{T}$.

如图 2 是在理想条件下, 即在无环境磁干扰以及载体平台无任何晃动情况下, 不同磁梯度张量定位方法的定位结果对比. 可以看出, 在理想情况下欧拉定位法的定位性能最好, 32s 左右出现的峰值是由于当运动载体靠近磁张量奇异面时, 磁张量矩阵近似为奇异阵而导致定位误差剧增. 另外, 本文方法的定位效果仅次于欧拉法, 优于三阶张量定位算法以及多点测量定位算法.

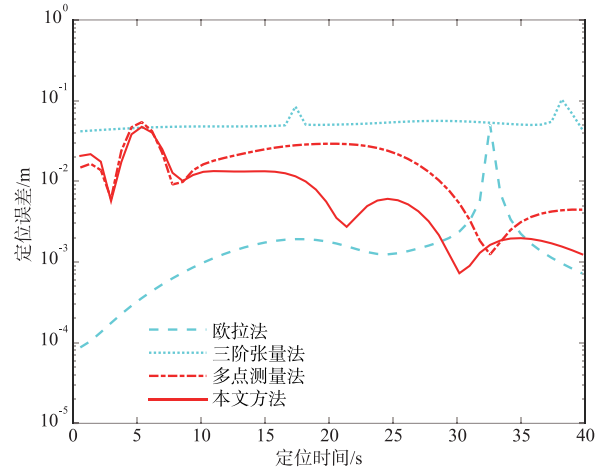


图2 理想条件下的定位误差

在实际的 AUV 平台磁梯度张量测量过程中, 磁场强度测量值总是受环境磁干扰及平台晃动的影响. 如图 3(a) ~ (f) 分别是晃动角标准差 σ 为 0° 、 0.001° 、 0.01° 、 0.1° 、 1° 和 10° 时不同定位方法的定位结果比较. 由图 3(a) 可知当存在环境磁干扰时, 磁场矢量 B 的

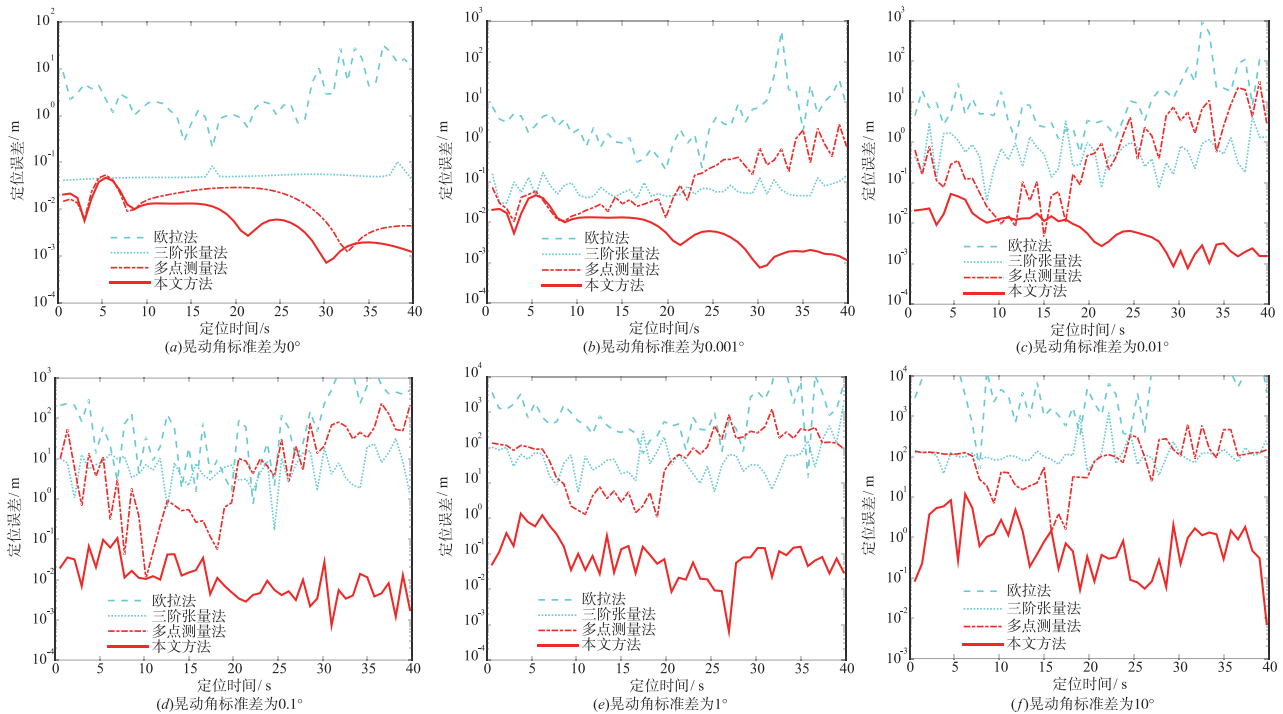


图3 平台晃动对定位误差的影响

测量受到干扰导致欧拉定位方法的性能恶化,而基于磁梯度张量的定位方法结果依然可靠。

对比图 3(a) ~ (f) 可知,当 AUV 平台晃动时,随着平台晃动幅度的增加,欧拉定位法失效,三阶张量定位算法以及多点定位测量算法的定位性能也严重恶化,而基于磁梯度张量特征值不变量提出的本文方法定位结果仍然最为准确,即使当晃动角度达到 10° 时,定位最大误差也不超过 15m。

理论上,本文方法的定位精度应该不受载体平台晃动的影响,然而从图 3 中可以看出随着晃动角度的增加,本文方法的定位误差也有一定程度的增加。这是因为这里的磁梯度张量是由 4 个磁传感器的磁场测量值计算而来,受基线长度影响,磁梯度张量计算值与实际的磁梯度张量存在一定误差。当测量坐标系与目标磁矩的夹角不同时,基线对磁梯度张量计算值影响程度也不同,因而不同的坐标系计算的磁梯度张量特征值不变量也有一些细微的差别。当载体晃动角度增加时,测量坐标系三轴指向性分布更广,从而特征值不变量之间的差别增加导致定位误差有一定程度的增大。当减小基线长度时,固然能一定程度上使得本文方法的抗晃动性能提升,但当存在磁梯度张量噪声时,基线长度过小则会导致磁梯度张量信噪比降低,进而影响定位的精度。本文综合考虑 AUV 平台的实际尺寸以及文献[18]中的基线测试结果,设定磁梯度张量测量系统基线 L 的长度为 0.5m。

5 结论

本文针对传统磁梯度张量方法定位精度易受运动载体平台晃动影响的问题,提出了一种基于十字形磁梯度张量系统的磁梯度张量特征值不变量的定位方法,算法能够有效克服载体平台晃动对定位精度带来的影响。仿真实验结果表明,在无环境磁干扰和平台无晃动的情况下,本文算法的定位精度仅次于欧拉定位法;当存在环境磁干扰时,欧拉法定位性能迅速恶化。相比于三阶张量定位算法与多点测量线性定位算法,无论环境磁干扰有无以及晃动角度多大,本文定位算法的性能皆优于两者,特别是当运动载体平台晃动角度增加到 10° 时,本文算法的定位最大误差也不超过 15m。此外,相对于三阶张量定位算法与多点测量线性定位算法,本文算法的代价在于要实现准确定位,AUV 载体平台必须要有一次上升或下潜动作,实际情况下这种代价是可以接受的,故本文定位算法是一种能够克服载体平台晃动影响的实用定位算法。

参考文献

[1] Stolz R, Zakosarenko V, Schulz M, et al. Magnetic full-tensor SQUID gradiometer system for geophysical applications [J]. *Leading Edge*, 2006, 25(2): 178 - 180.

- [2] Smith D V, Bracken R E. Field experiments with the tensor magnetic gradiometer system for UXO surveys: a case history [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2004, 23(1): 806 - 809.
- [3] Gamey T J, Doll W E, Beard L P. Initial design and testing of a full-tensor airborne SQUID magnetometer for detection of unexploded ordnance [J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2004, 23(1): 798 - 801.
- [4] 林春生, 向前, 龚沈光. 自适应双参考磁场梯度探测原理 [J]. *电子学报*, 2004, 32(3): 519 - 521.
Lin C S, Xiang Q, Gong S G. Principle of adaptive detection using dual-magnetic field gradient inputs as reference [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(3): 519 - 42. (in Chinese)
- [5] Allen G I, Sulzberger G, Bono J T, et al. Initial evaluation of the new real-time tracking gradiometer designed for small unmanned underwater vehicles [A]. *MTS/IEEE Oceans 2005* [C]. Washington D C: IEEE, 2005. 1965 - 1962.
- [6] Pei Y H, Yeo H G. UXO survey using vector magnetic gradiometer on autonomous underwater vehicle [A]. *MTS/IEEE Oceans 2009* [C]. Biloxi: IEEE, 2009. 1 - 8.
- [7] Pei Y H, Yeo H G. Magnetic gradiometer inversion for underwater magnetic object parameters [A]. *MTS/IEEE Oceans 2006* [C]. Singapore: IEEE, 2006. 1 - 6.
- [8] 贾文抖, 林春生, 陈春行, 等. 针对磁性目标定位失效的改进欧拉定位方法 [J]. *海军工程大学学报*, 2018, 30(3): 37 - 42.
Jia W D, Lin C S, Chen C H, et al. Improved euler method for preventing failure of positioning magnetic target [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2018, 30(3): 37 - 42. (in Chinese)
- [9] 张光, 张英堂, 李志宁, 等. 载体平动条件下的磁梯度张量定位方法 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(1): 21 - 24.
Zhang G, Zhang Y T, Li Z N, et al. Localizing method of magnetic field gradient tensor under carriers moving parallelly [J]. *Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 41(1): 21 - 24. (in Chinese)
- [10] 于振涛, 吕俊伟, 许素琴, 等. 运动平台的磁性目标实时定位方法 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2015, 36(5): 606 - 610.
Yu Z T, Lv J W, Xu S Q, et al. A real-time localization method of a magnetic target based on moving flat [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2015, 36(5): 606 - 610. (in Chinese)
- [11] 迟斌, 任建存, 吕俊伟, 等. 基于磁梯度张量的目标多测量点线性定位方法 [J]. *探测与控制学报*, 2017, 39(5):

- 58 – 62.
Chi C, Ren J C, Lv J W, et al. Linear localization method based on magnetic gradient tensor [J]. *Journal of Detection & Control*, 2017, 39(5): 58 – 62. (in Chinese)
- [12] 吕俊伟, 迟铨, 于振涛, 等. 磁梯度张量的椭圆误差消除方法研究 [J]. *物理学报*, 2015, 64(19): 190701-1 – 190701-8.
Lv J W, Chi C, Yu Z T, et al. Research on the asphericity error elimination of the invariant of magnetic gradient tensor [J]. *Acta Physica Sinica*. 2015, 64(19): 190701-1 – 190701-8. (in Chinese)
- [13] 贾文抖, 林春生, 孙玉绘, 等. 地磁场中磁目标的等效衰减磁矩定位方法 [J]. *兵工学报*, 2018, 39(2): 283 – 289.
Jia W D, Lin C S, Sun Y H, et al. Location method of equivalent attenuation magnetic moment of magnetic target in geomagnetic field [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(2): 283 – 289. (in Chinese)
- [14] 张朝阳, 肖昌汉, 高俊吉, 等. 磁性物体磁偶极子模型适用性的试验研究 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2010, 18(5): 862 – 868.
Zhang C Y, Xiao C H, Gao J J, et al. Experiment research of magnetic dipole model applicability for a magnetic object [J]. *Journal Basic Science and Engineering*, 2010, 18(5): 862 – 868. (in Chinese)
- [15] Takaaki N, Satoshi S, Shigeru A. A closed form formula for magnetic dipole localization by measurement of its magnetic field and spatial gradients [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(10): 3291 – 3293.
- [16] David A Clark. New methods for interpretation magnetic vector and gradient tensor data I: eigenvector analysis and the normalized source strength [J]. *Exploration Geophysics*, 2012, 43: 267 – 282.
- [17] 刘丽敏. 磁通门张量的结构设计、误差分析及水下目标探测 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.
Liu L M. Configuration Design, Error Analysis and Underwater Target Detection of Fluxgate Tensor Magnetometer [D]. Changchun: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [18] 贾文抖, 林春生, 陈春行, 等. 磁梯度张量的旋转计算方法 [J]. *国防科技大学学报*, 2018, 40(6): 183 – 188.
Jia W D, Lin C S, Chen C H, et al. Method of rotating-calculating magnetic gradient tensor [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2018, 40(6): 183 – 188. (in Chinese)

作者简介



马剑飞 男, 1993 年 01 月出生, 陕西武功人, 现为海军工程大学博士研究生, 研究方向为水下物理场探测和军用目标特性。
E-mail: 438922417@ qq. com



丁凯 男, 1983 年 06 月出生, 江苏南京, 2012 年于陆军工程大学取得博士学位, 现为近地面探测技术重点实验室工程师, 研究方向为目标磁场探测与信号分析。
E-mail: winfast113@ sina. com