

文章编号: 1671-7449(2024)05-0535-08

基于归一化磁源强度的磁目标实时定位方法

张樱子, 刘改改, 申雅丽, 王晨, 刘文怡

(中北大学 省部共建动态测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051)

摘要: 标量三角剖分与测距(STAR)方法利用磁梯度收缩特性实现运动状态下对单个磁偶极子目标的实时定位, 且对运动平台的姿态不敏感。然而, 磁梯度收缩量(C_T)引入的非球面误差会限制其定位精度。针对该问题, 提出了一种新的磁偶极子目标线性定位方法, 利用归一化磁源强度(NSS)代替 C_T , 消除了非球面误差的影响。为了分析该方法对不同方位磁目标的定位性能, 建立了全向仿真分析模型。仿真结果表明, 该方法的实时性与STAR方法相当, 在标准差为10 nT的高斯白噪声影响下与STAR方法的最大定位误差分别为0.18 m与1.5 m。现场实验结果表明, 当探测距离为1.284 m时, 该方法在纬线轨迹上的平均定位误差仅为0.094 m, 比传统STAR方法低56.7%; 在经线轨迹上的平均定位误差为0.097 m, 比传统STAR方法低30.7%。

关键词: 磁梯度张量; 磁目标定位; 磁偶极子; 归一化磁源强度

中图分类号: TP212

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024074

引用格式: 张樱子, 刘改改, 申雅丽, 等. 基于归一化磁源强度的磁目标实时定位方法[J]. 测试技术学报, 2024, 38(5): 535-542.

ZHANG Yingzi, LIU Gaigai, SHEN Yali, et al. Real-time magnetic target localization method based on normalized source strength[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(5): 535-542.

Real-Time Magnetic Target Localization Method Based on Normalized Source Strength

ZHANG Yingzi, LIU Gaigai, SHEN Yali, WANG Chen, LIU Wenyi

(State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The scalar triangulation and ranging (STAR) method can realize the real-time localization of a single magnetic dipole target in the moving state and is not sensitive to the attitude of the moving platform, which is based on the characteristics of magnetic gradient contraction. However, aspherical error introduced by magnetic gradient contraction (C_T) limit the localization accuracy. To solve this problem, a new linear localization method for magnetic dipole target is proposed in this paper, which uses normalized source strength (NSS) instead of C_T to eliminate the influence of aspherical errors. In order to analyze the localization performance of the proposed method on magnetic targets with different orientations, an omnidirectional simulation model with a detection range of 10m was established. The simulation results show that the real-time performance of the proposed method is as good as that of the STAR method, and the maximum localization errors of the proposed method and the STAR method are 0.18 m and 1.5 m respectively under the influence of noise. Field experiment results show that when the detection distance is

收稿日期: 2024-05-30

基金项目: 省部共建动态测试技术国家重点实验室基金资助项目(2023-SYSJJ-05); 国家自然科学基金资助项目(62201523)。

作者简介: 张樱子(1989-), 女, 讲师, 博士, 主要从事弱磁探测研究。E-mail: zhangyingzi@nuc.edu.cn。

1.284 m, the average localization error of the proposed method on the latitude trajectory is only 0.094 m, which is 56.7% lower than that of the traditional STAR method. The average localization error on the longitude trajectory is 0.097 m, which is 30.7% lower than the traditional STAR method.

Key words: magnetic gradient tensor; magnetic target localization; magnetic dipole; normalized source strength

0 引言

与总磁场强度 (Total Magnetic Intensity, TMI) 测量和磁场矢量测量相比, 磁梯度张量测量不仅不受地磁背景场和磁目标磁化方向影响, 还可以通过磁梯度张量反演算法直接对磁目标进行定位^[1]。因此, 构建磁梯度张量测量系统并结合磁梯度张量反演算法对磁目标进行探测与定位是目前磁异常探测领域的研究热点, 可以应用于未爆弹药探测、水下目标追踪、沉船打捞等场景^[2-4]。

当探测距离大于磁目标大小的2.5倍时, 该目标可以近似等效为磁偶极子^[5]。为了提高定位精度, 科研人员对基于磁梯度张量反演的磁偶极子定位方法进行了广泛研究, 主要可以分为单点磁梯度张量定位方法和多点磁梯度张量定位方法两类。然而, 当探测系统需要搭载在运动平台上时, 多点磁梯度张量定位方法较难实施, 单点磁梯度张量定位方法更具优势。在目前的单点磁梯度张量定位方法中, Wynn等^[6]和Wilson^[7]提出的基于磁梯度张量特征值和特征向量的定位方法由于固有的四重模糊属性会出现3个虚假解, 需要增加其他辅助信息才能获得唯一解, 计算较复杂; Nara等^[8-9]提出的用磁梯度张量的逆矩阵去乘磁场矢量来求解相对位置的方法计算简单且实时性强, 但磁偶极子目标的磁场矢量很难从地磁场环境中准确提取出来, 极易受地磁场环境的影响。为了消除地磁场噪声的影响, Sui等^[10]和李青竹等^[11]提出了一些单点高阶磁梯度张量定位方法, 但这些方法更容易受到仪器测量误差的影响。因此, Wiegert等^[12-14]提出的标量三角剖分与测距 (Scalar Triangulation and Ranging, STAR) 方法因其实时性高、对载体姿态不敏感等优点备受关注。但该方法引入的磁梯度张量收缩量 (C_T) 中存在非球面参数, 在计算磁目标的距离和方向向量时会引入固有误差^[15], 称为非球面误差。为了降低非球面误差的影响, Lin等^[16]和Wang等^[17]都提出用迭代法补偿方位误差的定位方法, 然而这些方法不仅牺牲了传统STAR方法的实时性, 而且没有

经过试验验证。

2012年, Clark等^[18]提出了一个新的磁梯度旋转不变量——归一化磁源强度 (Normalized Source Strength, NSS), 其在磁偶极子源周围是完全各向同性的。因此, 本文基于NSS提出了一种新的STAR方法 (New STAR Method, NSM), 不仅从根本上消除了非球面误差, 还保留了传统STAR方法对载体姿态不敏感、不受地磁场影响、实时性高等优点。为了全面、准确地评价该方法的有效性, 提出了一种全向仿真分析模型。仿真和现场实验均表明, 该方法能够实现高精度、实时的磁偶极子目标定位。

1 定位方法

1.1 磁梯度张量和旋转不变量

根据磁偶极子模型公式可知, 磁目标在观测点产生的磁场矢量 B 可以表示为^[19]

$$B = \frac{\mu}{4\pi} \frac{3(M \cdot R)R - Mr^2}{r^5}, \quad (1)$$

式中: M 为磁目标的磁矩矢量; R 为磁目标到观测点的相对位置矢量; r 为 R 的模; μ 为观测点处介质的磁导率, 在空气中, $\mu \approx \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ (μ_0 为真空磁导率)。磁场矢量 B 的3个分量在3个相互正交方向上的空间变化率被定义为一阶磁梯度张量 G ^[20], 其表达式如下

$$G = \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{xx} & B_{xy} & B_{xz} \\ B_{xy} & B_{yy} & B_{yz} \\ B_{xz} & B_{yz} & -B_{xx} - B_{yy} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

根据麦克斯韦方程, 磁场矢量 B 在无源静磁场中的散度和旋度均为0, 经过推导可知磁梯度张量矩阵 G 是对称且无迹的, 具有3个实数特征值^[18]。

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

式中: $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 0$ ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$ 且 $|\lambda_1| \geq |\lambda_2|$),

$|\lambda_3| \geq |\lambda_2|$; $m = |\mathbf{M}|$ 为磁矩矢量的模; θ 为相对位置矢量 \mathbf{R} 与磁矩矢量 \mathbf{M} 的夹角。

在传统 STAR 方法中定义 G 的 Frobenius 范数为磁梯度张量收缩量 C_T , 其表达式如下

$$C_T = \|\mathbf{G}\|_F = k_0 \frac{\mu_0 m}{4\pi r^4}, \quad (4)$$

式中: $k_0 = 3\sqrt{4\cos^2\theta + 2}$ 为表征 C_T 场偏离球对称程度的非球面参数, 其大小与 R 和 M 的夹角 θ 有关, 取值范围为 4.2~7.2。 k_0 在目标偶极轴方向上的场点最大为 7.2, 在与目标偶极轴垂直方向上的场点最小为 4.2, 因此, C_T 在磁目标周围的分布各向异性, 等值线分布如图 1(a) 所示。传统 STAR 方法中利用测量阵列两个点处的 C_T 和两个点与磁目标之间相对位置矢量模值 r 之间的关系来实现定位, 在近似计算中将球目标周围的 C_T 看作各向同性分布, 引入了非球面误差。由于 C_T 是一种旋转不变量, 所以传统 STAR 方法可以抵抗运动噪声。

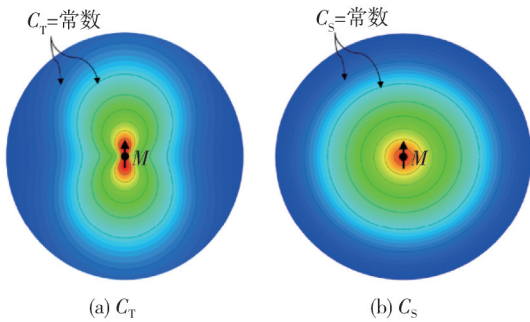


图 1 旋转不变量 C_T 和 C_S 的等值线

Fig. 1 Contours of the rotationally invariants C_T and C_S

归一化磁源强度 NSS 也是一种旋转不变量, 在文中记作 C_S , 可以表示为^[18]

$$C_S = \sqrt{-\lambda_2^2 - \lambda_1\lambda_3} = \frac{3\mu_0 m}{4\pi r^4}. \quad (5)$$

如图 1(b) 所示, 与 C_T 相比, C_S 的分布各向同性, 没有非球面参数, 不受磁目标磁矩矢量方向的影响。因此, 本文基于测量阵列两个点处的 C_S 和两个点与磁目标之间相对位置矢量模值 r 之间的关系提出一种新的单点磁偶极子目标实时定位方法 NSM, 消除了非球面误差且对运动平台姿态不敏感。

$$\begin{cases} \mathbf{n}_r = \frac{\nabla C_S}{|\nabla C_S|}, \\ \nabla C_S = \frac{C_{Sx+} - C_{Sx-}}{D_x} \mathbf{i} + \frac{C_{Sy+} - C_{Sy-}}{D_y} \mathbf{j} + \frac{C_{Sz+} - C_{Sz-}}{D_z} \mathbf{k}, \end{cases} \quad (7)$$

式中: \mathbf{i}, \mathbf{j} 和 \mathbf{k} 分别为沿 x, y 和 z 轴的单位向量。

1.2 NSM 的定位原理

在 NSM 方法中首先采用 8 个三轴磁通门传感器组成立方体结构测量阵列来获取磁目标的磁场信息, 如图 2 所示。以测量阵列的中心为笛卡尔坐标系的原点, D_x, D_y, D_z 分别表示原点到测量阵列在 x, y 和 z 方向上各个面的基线距离。通过立方体测量阵列每个面上的 4 个三轴磁通门传感器可以得到测量阵列每个面中心点的磁梯度张量矩阵。

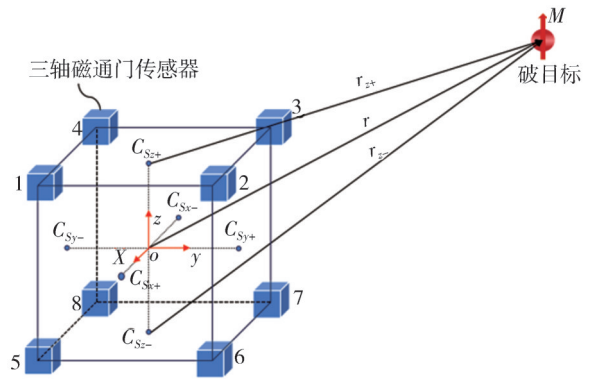


图 2 NSM 的定位原理示意图

Fig. 2 Sketch map of the localization principle of the NSM

以 z 轴正向阵列面上磁梯度张量矩阵 G_{z+} 的计算为例,

$$G_{z+} = \begin{bmatrix} \frac{B_x^1 + B_x^2 - B_x^3 - B_x^4}{2D_x} & \frac{B_x^2 + B_x^3 - B_x^1 - B_x^4}{2D_y} & * \\ \frac{B_y^2 + B_y^3 - B_y^1 - B_y^4}{2D_y} & \frac{B_y^2 + B_y^3 - B_y^1 - B_y^4}{2D_y} & * \\ \frac{B_z^1 + B_z^2 - B_z^3 - B_z^4}{2D_x} & \frac{B_z^2 + B_z^3 - B_z^1 - B_z^4}{2D_y} & * \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: $B_i^j (i=x, y, z; j=1, 2, 3, 4)$ 为 j 号传感器的 i 分量的读数。测量阵列其他面上的磁梯度张量矩阵的计算公式类似于式(6)。然后, 根据式(5)可以计算出测量阵列每个面上的 C_S 。

标量场的空间梯度是指向标量场的最大变化率的方向的矢量场。因此, C_S 的梯度 (∇C_S) 是从测量点指向磁性目标的矢量, 其单位方向向量 \mathbf{n}_r 可通过下式计算

根据磁目标和测量阵列的空间位置关系和一

阶麦克劳林公式,可以推出

$$r_{z+} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}D_z k - r\right)^2} = r \left[1 - \frac{D_z}{r}(n_r \cdot k) + \left(\frac{D_z}{2r}\right)^2 \right]^{1/2} \approx r - \frac{1}{2}D_z(n_r \cdot k), \quad (8)$$

同理,

$$r_{z-} = \sqrt{\left(-r - \frac{1}{2}D_z k\right)^2} \approx r + \frac{1}{2}D_z(n_r \cdot k), \quad (9)$$

式中: r 为从测量阵列中心到磁目标的相对位置矢量 R 的模; r_{z+} 和 r_{z-} 分别为 z 轴正负方向上测量阵列两个面的中心点到磁目标相对位置矢量的大小。结合式(5)、式(8)和式(9),可以推出

$$\frac{C_{S_{z+}}}{C_{S_{z-}}} = \left(\frac{r_{z-}}{r_{z+}}\right)^4 = \left[\frac{r + 0.5D_z(n_r \cdot k)}{r - 0.5D_z(n_r \cdot k)}\right]^4. \quad (10)$$

从式(10)可以推导出 r 的计算公式,然后就可得到相对位置矢量 R 的计算公式为

$$R = r \cdot n_r = \left\{ D_z \left(\frac{\nabla C_S}{|\nabla C_S|} \cdot k \right) \left[\left(\frac{C_{S_{z+}}}{C_{S_{z-}}} \right)^{1/4} - 1 \right]^{-1} + \frac{D_z}{2} \left(\frac{\nabla C_S}{|\nabla C_S|} \cdot k \right) \right\} \cdot \frac{\nabla C_S}{|\nabla C_S|}. \quad (11)$$

因此,根据式(11)可以直接求出观测点到磁目标的相对位置矢量,从根本上消除了非球面误差。然而,当 $C_{S_{z+}} = C_{S_{z-}}$ 时,无法实现对磁目标的定位,此时可采用 $C_{S_{x+}}$, $C_{S_{x-}}$ 或 $C_{S_{y+}}$, $C_{S_{y-}}$ 来代替求解。

2 仿真分析

为了分析NSM方法对任意方位磁目标的定位性能,本文建立了一个球形的全方位仿真分析模型,如图3所示。在该模型中,磁目标在球面上运动,其磁矩矢量 $M = (1\,000\,000, 1\,000\,000, 1\,000\,000) \text{ A} \cdot \text{m}^2$,探测距离 r 为10 m,立方体测量阵列中基线 D_x 、 D_y 、 D_z 均为0.2 m,三轴磁通门传感器的分辨率为0.1 nT,磁目标在球面位置的俯仰角 θ 从 0° 变化到 180° ,方位角 α 从 0° 变化到 360° ,变化幅度为 1° 。因此,每一次完整的全向仿真分析过程中测量阵列要对磁目标定位65 341次。为了验证NSM的定位能力,在

MATLAB中利用仿真的磁目标数据对NSM和传统STAR方法的定位误差以及单点定位时间进行了计算。定位误差可以表示为

$$\epsilon = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}, \quad (12)$$

式中: (x_0, y_0, z_0) 为磁目标的真实坐标, (x_i, y_i, z_i) 为磁目标的估算坐标。仿真代码在一台配备英特尔®酷睿™Ultra 7 155H处理器的笔记本电脑上进行,处理器主频为1.4 GHz。

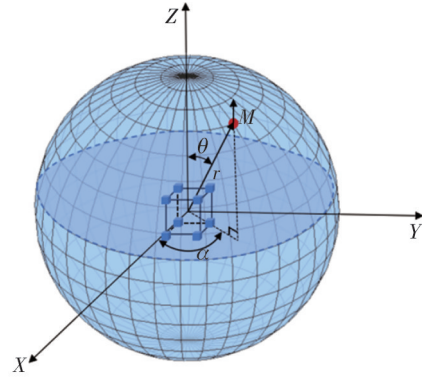


图3 全向仿真分析模型

Fig. 3 Omnidirectional simulation analysis model

2.1 无噪声影响

理想情况下,NSM方法与传统STAR方法的定位误差分布图如图4所示。

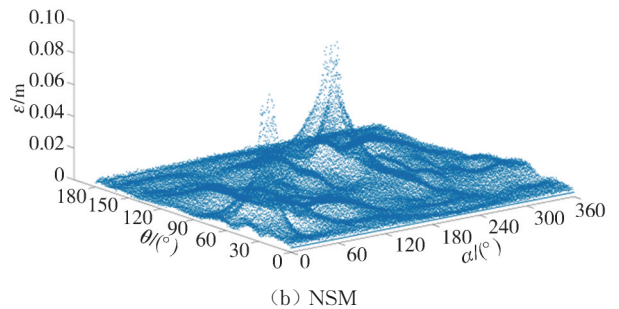
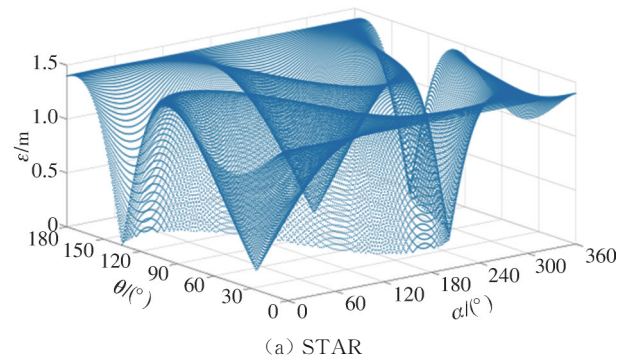


图4 无噪声定位误差分布图

Fig. 4 Localization error distribution maps without noise

STAR方法的平均定位误差为1.063 1 m,最大定位误差为1.428 9 m,单点平均定位时间为89 μ s。与STAR方法,NSM方法的定位误差显著减小,其平均定位误差为0.006 6 m,最大定位误差为0.081 8 m,单点平均定位时间为119 μ s。经过分析,STAR方法的误差分布与 M 和 R 的夹角密切相关,这是由于非球面参数 k 的存在使得 C_T 的梯度不能精确指向目标,存在方向误差,难以消除。而NSM方法完全消除了非球面误差,尽管在某些位置处由于有限差分近似偏导数求解磁梯度张量和旋转不变量导致的差分近似误差比较突出,但其最大定位误差仍远小于STAR方法。

2.2 有噪声影响

在实际探测过程中,磁噪声的影响不可避免,主要包括磁强计噪声和环境噪声,而轻微的地磁活动就会造成 ± 10 nT的波动。因此,为了验证该方法在实际应用中的可行性,在8个三轴磁通门传感器的每个通道中加入均值为0、标准差为10 nT的高斯白噪声,其他模拟条件与2.1节保持一致,仿真结果如图5所示。

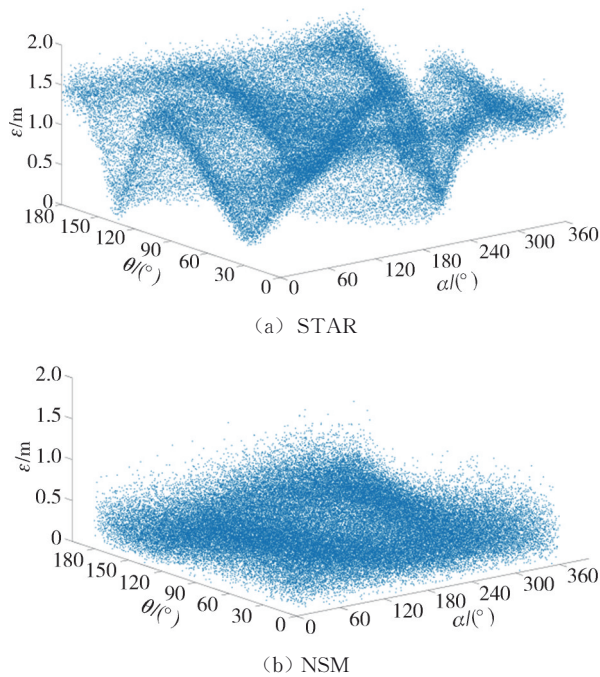


图5 有噪声定位误差分布图

Fig. 5 Localization error distribution maps with noise

由图可以看出,添加噪声后两种方法的定位误差都增加了。STAR方法的平均定位误差为1.088 5 m,最大定位误差为1.897 5 m,单点平均定位时间为77 μ s。NSM方法的定位误差整体都

比STAR方法的小,其平均定位误差为0.384 2 m,最大定位误差为1.607 2 m,单点平均定位时间仍为119 μ s。在65 341个测点中,STAR方法的定位误差超过1.000 0 m的测点有43 108个,NSM方法的定位误差超过1.000 0 m的测点仅有441个。因此,NSM具有良好的抗噪性能,考虑到磁性目标与测量阵列之间的探测距离,其平均相对定位误差小于0.39%。

综上所述,通过综合比较误差分布、最大误差和平均误差,NSM的定位精度更高,实时性也符合要求。在实际应用中,可以根据全方位仿真分析模型获得的定位误差分布特征进行定位方法的组合,以进一步提高定位精度与噪声抑制能力。

3 试验与结果分析

为了测试NSM方法在实际探测中的定位性能,本文在磁场相对稳定的密闭空间内开展了现场试验。如图6所示,本实验系统主要包括磁目标、磁通门测量阵列、电源和数据采集模块以及计算机。

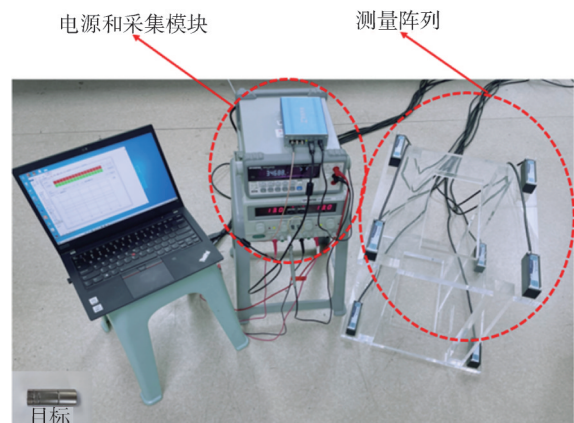


图6 实验系统示意图

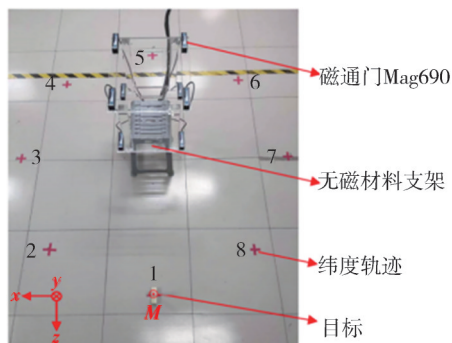
Fig. 6 The experimental system diagram.

磁目标是一块由钕制成的磁铁,磁矩矢量方向为圆柱体中心轴方向。磁通门测量阵列由英国巴廷顿仪器公司生产的8台三轴磁通门磁强计(Mag690)组成, x 、 y 、 z 方向的基线距离为40 cm。立方体结构支架由无磁亚克力材料制成。24个通道的信号由同一模块采集,保证了采集精度的一致性。此外,为了尽量减少地磁日变化的影响,实验时间为凌晨1点至凌晨3点,环境温度约为20 $^{\circ}$ C。由于在实测时很难构建一个全方位仿真分析模型的实验平台,因此,本文类比地球坐标系,假定测量阵列在地球中心,设定方向不同的2种

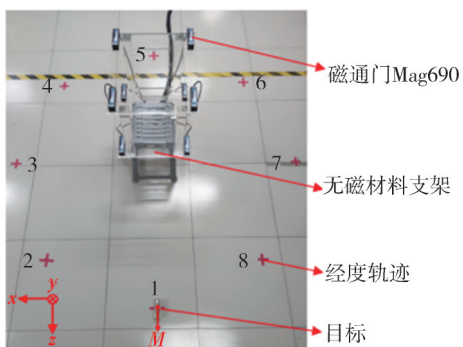
定位轨迹(纬线轨迹和垂直于纬线轨迹的经线轨迹)进行实验验证。

3.1 纬线轨迹实验

以测量阵列的中心点为原点建立笛卡尔坐标系,磁目标沿着以测量阵列为中心的圆形轨迹运动,如图 7(a) 所示。运动过程中,目标垂直地平面放置,即磁矩矢量方向垂直向上,圆形运动轨迹为垂直于磁矩矢量方向的纬线轨迹。纬线轨迹位于 $y = -0.662 \text{ m}$ 的平面上,其圆心为测量阵列中心点在该平面上的投影,半径为 1.284 m ,在同样原点球形坐标系中的俯仰角 θ 约为 60° 。磁目标在纬线轨迹上运动时,每次旋转的角度为 45° ,因此需要定位的目标位置有 8 个,编号为 1~8。为了降低外加磁场的影响,在放置磁目标之前测量了背景磁场。放置磁目标之后,从传感器的读数中减去背景场以获得最终目标磁场信息。实验共获得 8 组测量数据。然后,利用 STAR 方法和 NSM 方法进行数据反演,结果如图 8 所示。表 1 显示了各方法在各个位置的定位误差。



(a) 纬线轨迹



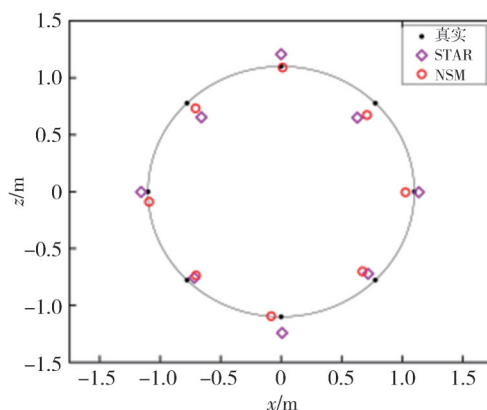
(b) 经线轨迹

图 7 实验轨迹示意图

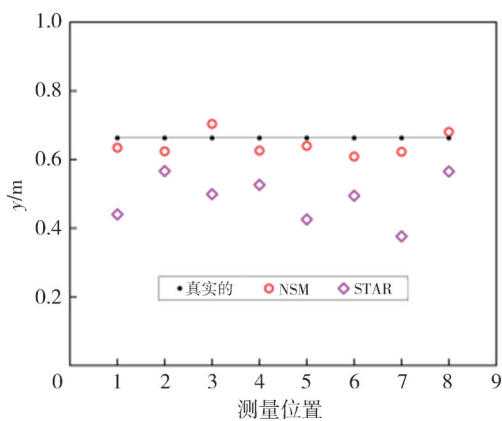
Fig. 7 The experimental trajectory diagram

实验结果表明,STAR 方法的最小误差为 0.158 m ,比 NSM 方法的最大误差大 0.023 m 。STAR 方法的最大定位误差为 0.291 m ,考虑到磁

目标与测量阵列之间的探测距离,其最大相对定位误差可达 22.7% 。NSM 方法在每个位置的定位误差都小于 STAR 方法,平均定位误差仅为 0.094 m ,与 STAR 方法相比减小了 56.7% 。考虑探测距离,NSM 方法的最大相对定位误差为 10.5% ,平均相对定位误差为 7.3% 。



(a) $x-z$ 平面



(b) y 轴

图 8 纬线轨迹上的定位结果

Fig. 8 Localization results on the latitude trajectory

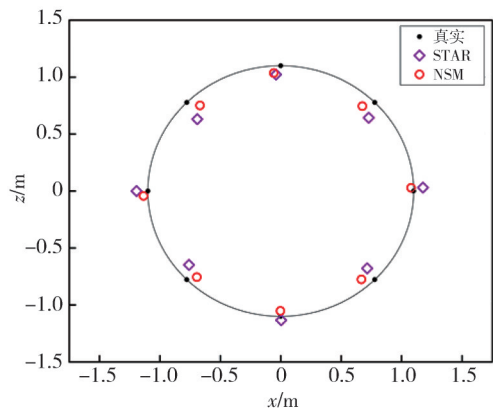
表 1 纬线轨迹每个位置的定位误差

Tab. 1 Localization errors for each position of the latitude trajectory

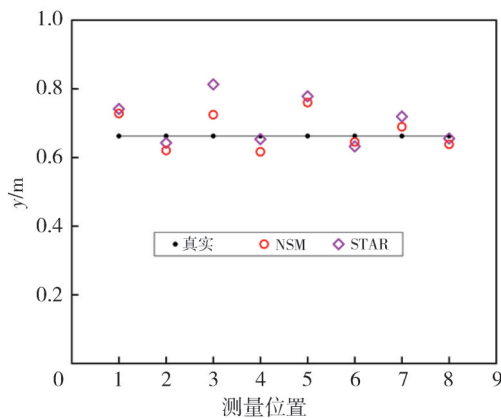
位置	定位误差/m	
	STAR	NSM
1	0.246	0.032
2	0.218	0.131
3	0.167	0.084
4	0.158	0.135
5	0.276	0.085
6	0.179	0.100
7	0.291	0.099
8	0.197	0.087
平均误差	0.217	0.094

3.2 经线轨迹实验

如图 7(b) 所示, 以测量阵列的中心点为原点建立笛卡尔坐标系, 磁目标沿着以测量阵列为中心的圆形轨迹运动。与 3.1 小节不同的是, 运动过程中, 目标水平放置, 即磁矩矢量方向平行于地平面, 则设定圆形运动轨迹为平行于磁矩矢量方向的经线轨迹。当目标在经线轨迹上运动时, 俯仰角 θ 从 0° 变化到 180° , 定位误差的变化相对完整。其他实验参数设置与纬线轨迹相同, 实验结果和各位置的定位误差分别如图 9 和表 2 所示。可以看出, 与俯仰角 θ 约为 60° 的纬线轨迹相比, STAR 法的平均定位误差大大减小, 但仍高于 NSM 方法。STAR 方法的最大定位误差为 0.172 m, 考虑到磁目标与测量阵列之间的探测距离, 其最大相对定位误差为 13.4%, 平均相对定位误差为 10.9%。NSM 方法的最大相对定位误差为 8.9%, 平均相对定位误差为 7.6%, 与 STAR 方法相比减小了 30.7%。



(a) x-z 平面



(b) y 轴

图 9 经线轨迹上的定位结果

Fig. 9 Localization results on the longitude trajectory

表 2 经线轨迹每个位置的定位误差

Tab. 2 Localization errors for each position of the longitude trajectory

位置	定位误差/m	
	STAR	NSM
1	0.122	0.108
2	0.145	0.114
3	0.172	0.072
4	0.15	0.115
5	0.121	0.109
6	0.133	0.084
7	0.11	0.059
8	0.17	0.115
平均误差/m	0.14	0.097

4 结 论

固有非球面误差的存在制约了传统 STAR 方法的实际应用, 用迭代改进算法来消除非球面误差又存在耗时长、定位精度有限等问题。在这种背景下, 本文提出了一种利用旋转不变量 C_s 代替旋转不变量 C_T 来实现高精度磁偶极子目标实时定位的 NSM 方法。通过全方位仿真分析模型对 NSM 方法的定位性能进行了研究, 仿真结果表明 NSM 方法在理想条件和噪声影响下定位精度都优于 STAR 方法, 且并没有牺牲其实时性能。现场实验结果也证明了 NSM 方法具有较高的定位精度和实时性, 在纬线轨迹的平均定位误差为 0.094 m, 与 STAR 方法相比减小了 56.7%; 在经线轨迹的平均定位误差为 0.097 m, 与 STAR 方法相比减小了 30.7%。考虑探测距离, 其纬线轨迹平均相对定位误差仅为 7.3%, 经线轨迹平均相对定位误差仅为 7.6%。该方法易于实现且完全消除了非球面误差, 可为水下目标动态探测与追踪领域提供理论与技术支撑。

参考文献:

[1] 商志刚, 严晓芳, 左涛. 超导量子干涉技术与测磁应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.

[2] 马剑飞, 丁凯, 颜冰, 等. 基于水下运动平台的磁性目标跟踪与特征反演[J]. 兵工学报, 2021, 42(9): 1951-1961.

MA Jianfei, DING Kai, YAN Bing, et al. A magnetic gradient tracking method for target tracking and characteristics inversion [J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(9): 1951-1961. (in Chinese)

[3] WANG X, LIU H, WANG H, et al. Quantitative

- analysis of the measurable areas of differential magnetic gradient tensor systems for unexploded ordnance detection[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(5): 5952-5960.
- [4] HU S, TANG J, REN Z, et al. Multiple underwater objects localization with magnetic gradiometry [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2019, 16(2): 296-300.
- [5] 张樱子, 邱隆清, 荣亮亮, 等. 超导磁梯度张量探测系统单点定位方法研究[J]. *低温与超导*, 2023, 51(8): 12-16.
ZHANG Yingzi, QIU Longqing, RONG Liangliang, et al. Research on single point localization method for superconducting magnetic gradient tensor detection system [J]. *Low Temperature and Superconductivity*, 2023, 51(8): 12-16. (in Chinese)
- [6] WYNN W, FRAHM C, CARROLL P, et al. Advanced superconducting gradiometer/magnetometer arrays and a novel signal processing technique[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1975, 11(2): 701-707.
- [7] WILSON H. Analysis of the magnetic gradient tensor: defence research establishment pacific[J]. *Technical Memorandum*, 1985, 8: 5-13.
- [8] NARA T, SUZUKI S, ANDO S. 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.
- [9] NARA T, ITO W. Moore-Penrose generalized inverse of the gradient tensor in Euler's equation for locating a magnetic dipole[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(17): 17E504.
- [10] SUI Y, LESLIE K, CLARK D. Multiple-order magnetic gradient tensors for localization of a magnetic dipole [J]. *IEEE Magnetics Letters*, 2017, 8: 6506605.
- [11] 李青竹, 李志宁, 张英堂, 等. 基于二阶磁张量欧拉反褶积的磁源单点定位方法[J]. *石油地球物理勘探*, 2019, 54(4): 915-924.
LI Qingzhu, LI Zhining, ZHANG Yingtang, et al. Magnetic source single-point positioning based on second-order magnetic tensor Euler deconvolution[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2019, 54(4): 915-924. (in Chinese)
- [12] WIEGERT R, OESCHGER J. Generalized magnetic gradient contraction based method for detection, localization and discrimination of underwater mines and unexploded ordnance [C]//*Proceedings of OCEANS 2005 MTS/IEEE*, 2005: 1325-1332.
- [13] WIEGERT R, LEE K, OESCHGER J. Improved magnetic STAR methods for real-time, point-by-point localization of unexploded ordnance and buried mines [C]//*OCEANS*, 2008: 1-7.
- [14] WIEGERT R F. Magnetic STAR technology for real-time localization and classification of unexploded ordnance and buried mines [C]//*SPIE Proceedings, Detection and Sensing of Mines, Explosive Objects, and Obscured Targets XIV*, 2009: 514-522.
- [15] LI X, YAN S, LIU J, et al. Novel magnetic localization methods for minimizing the ellipse error based on tensor invariants[J]. *IEEE Magnetics Letters*, 2022, 13: 8105205.
- [16] LIN S, PAN D, WANG B, et al. Improvement and omnidirectional analysis of magnetic gradient tensor invariants method [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(8): 7603-7612.
- [17] WANG C, ZHANG X, QU X, et al. A modified magnetic gradient contraction based method for ferromagnetic target localization [J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 2168.
- [18] CLARK D A. New methods for interpretation of magnetic vector and gradient tensor data I: eigenvector analysis and the normalised source strength[J]. *Exploration Geophysics*, 2012, 43(4): 267-282.
- [19] LIU G, ZHANG Y, WANG C, et al. A new magnetic target localization method based on two-point magnetic gradient tensor[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(23): 6088.
- [20] 张樱子, 秦肖雅, 王晨, 等. 超导磁梯度张量探头结构优化方法研究[J]. *低温与超导*, 2023, 51(10): 13-18.
ZHANG Yingzi, QIN Xiaoya, WANG Chen, et al. Research on structural optimization method of superconducting magnetic gradient tensor probe [J]. *Low Temperature and Superconductivity*, 2023, 51(10): 13-18. (in Chinese)