

基于不敏粒子滤波的水中非合作磁性目标 实时磁定位方法*

姚振宁[†] 刘大明 刘胜道 朱兴乐

(海军工程大学电气工程学院, 武汉 430033)

(2014年5月21日收到; 2014年7月15日收到修改稿)

针对水中非合作磁性目标的实时定位问题, 提出了一种基于不敏粒子滤波 (unscented particle filter, UPF) 的实时磁定位方法. 从非合作磁性目标的运动特征出发, 建立了状态空间模型, 利用 UPF 算法对目标状态进行实时估计. 为了提高系统的可观测性, 在算法迭代过程中对粒子状态进行约束及利用最小二乘法反演磁矩. 仿真与铁磁物体定位实验结果表明, 该方法的定位精度较高, 实时定位效果较好, 可用于近场实时磁定位问题中.

关键词: 磁定位, 椭球体模型, 状态空间模型, 不敏粒子滤波

PACS: 75.40.Mg, 02.50.-r

DOI: 10.7498/aps.63.227502

1 引言

在舰船物理场测量、港口磁防御和水中兵器引信控制等应用领域, 经常遇到目标磁定位问题. 磁定位就是通过建立磁场模型, 利用磁场测量数据反演求出目标的位置和运动状态^[1]. 小型潜艇、水下航行器等水中非合作磁性目标容易渗透到近岸港口区域进行偷袭破坏行动, 则可以通过布设在海底的传感器阵列测量其磁场, 利用磁定位方法对其进行实时定位, 以保卫港口、重要水道以及近海重要目标安全.

磁定位问题一般分为远场磁定位问题和近场磁定位问题. 远场磁定位方法是建立在传感器远离目标且目标磁场可以用单个磁偶极子模拟的基础上, 主要有基于磁场三分量时域特征的二次差分矩阵法和频域特征的频谱匹配法^[2]、神经网络法^[3]、欧拉反卷积法^[4]、小波分析法^[5]和递归贝叶斯法^[6]以及综合磁场梯度张量与磁场三分量的线性探测方法^[7]等. 近场磁定位方法主要有神经网络法^[8]、

小波分析法^[9]和混合优化算法^[10]等. 由于布设在近岸海底的传感器阵列与水中非合作磁性目标间的相对距离较小, 所以近场磁定位方法适用于水中非合作磁性目标的定位.

然而, 水中非合作磁性目标的定位对实时性要求较高, 而目前近场磁定位方法的研究主要集中在离线情况下估算目标航迹, 实时性较差. 因此, 本文建立了水中非合作磁性目标的状态空间模型, 利用不敏粒子滤波 (UPF) 算法对目标状态进行实时估计, 并在算法迭代过程中对粒子状态进行约束, 并利用最小二乘法反演磁矩, 提出了基于 UPF 的水中非合作磁性目标实时磁定位方法.

2 非合作磁性目标磁场模型

目前用于描述目标磁场的模型主要有单个磁偶极子、磁偶极子阵列、单个椭球体、椭球体阵列以及椭球体和磁偶极子组成的混合阵列等. 单个磁偶极子适合模拟远场磁场, 而模拟近场磁场产生的模型误差较大. 磁偶极子阵列、椭球体阵列和混合阵

* 国家自然科学基金 (批准号: 51377165, 51107145) 资助的课题.

[†] 通讯作者. E-mail: yaozhenning1987@163.com

列虽然能够有效模拟目标磁场,但是会极大地增加模型的未知参数,一方面对输入数据量要求较高,另一方面使得计算量变大,影响磁定位的实时性.

单个椭球体模型的未知参数较少,利用部分磁场测量数据就能完成对整个空间磁场的有效建模,具有较好的外推、预测能力^[11],并且椭球体的焦距能够作为目标长度的识别参数.因此,采用单个椭球体模型作为非合作磁性目标磁场模型.

椭球体模型如图 1 所示. 设椭球体中心在坐标

原点,其磁矩 $\mathbf{m} = (m_x, m_y, m_z)^T$, 则该椭球体在空间某点 (x, y, z) 产生的磁感应强度三分量为

$$\begin{cases} B_x = f_x m_x + f_y m_y + f_z m_z \\ B_y = g_x m_x + g_y m_y + g_z m_z \\ B_z = e_x m_x + e_y m_y + e_z m_z \end{cases}, \quad (1)$$

式中, $(f_x, f_y, f_z, g_x, g_y, g_z, e_x, e_y, e_z)$ 为椭球体磁场计算系数,可按下式计算

$$\begin{cases} f_x = \frac{3\mu}{4\pi} \left(\frac{a}{g^2 t} - \frac{1}{2g^3} \ln \frac{a+g}{a-g} \right) \\ g_y = \frac{3\mu}{8\pi} \left(\frac{1}{2g^3} \ln \frac{a+g}{a-g} + \frac{2ay^2}{b^4 t} - \frac{a}{b^2 g^2} \right) \\ e_z = \frac{3\mu}{8\pi} \left(\frac{1}{2g^3} \ln \frac{a+g}{a-g} + \frac{2az^2}{b^4 t} - \frac{a}{b^2 g^2} \right) \\ f_y = \frac{3\mu xy}{4\pi ab^2 t}, \quad f_z = \frac{3\mu xz}{4\pi ab^2 t}, \quad g_z = \frac{3\mu ayz}{4\pi b^4 t} \\ g_x = f_y, e_x = f_z, e_y = g_z \\ t = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2 + g^2)^2 - 4g^2 x^2} \\ a = \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2 + g^2 + t)/2} \\ b = \sqrt{a^2 - g^2} \end{cases}, \quad (2)$$

式中, μ 为磁导率, g 为椭球体的半焦距.

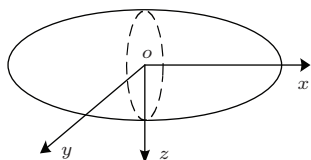


图 1 椭球体模型

3 基于UPF的实时磁定位方法

实时磁定位问题可以描述为在给定一组磁场测量数据条件下对系统状态进行实时估计的问题,本文利用UPF算法对非合作磁性目标状态进行实时估计.建立能够有效描述系统动态特性的数学模型是采用UPF算法处理估计问题的首要步骤,这种数学模型称为状态空间模型.

3.1 状态空间模型

状态空间模型是由描述目标运动模型的状态模型和描述测量信息的量测模型两部分组成.

非合作磁性目标相对传感器的位置 (x, y, z) 、航向 θ 以及航速 v 能够完整描述非合作磁性目标的运动状态,尺寸参数长度 L 是用来识别目标的常用手段,且考虑到非合作磁性目标在一定水深下的匀速直线运动特征,则状态模型为

$$\begin{cases} x_k = x_{k-1} + \Delta T * v_{k-1} * \cos(\theta_{k-1}) \\ y_k = y_{k-1} + \Delta T * v_{k-1} * \sin(\theta_{k-1}) \\ z_k = z_{k-1} \\ \theta_k = \theta_{k-1} + \varepsilon_{\theta,k-1} \\ v_k = v_{k-1} + \varepsilon_{v,k-1} \\ L_k = L_{k-1} \end{cases}, \quad (3)$$

式中, (x_k, y_k, z_k) 表示 k 时刻非合作磁性目标相对传感器的位置, θ_k 和 v_k 分别表示 k 时刻的航向和航速, L_k 表示长度, $\varepsilon_{\theta,k}$ 和 $\varepsilon_{v,k}$ 分别表示 k 时刻航向和航速的噪声, ΔT 表示传感器采样周期. 非合作磁性目标的磁矩也是未知量,但其与量测数据成线性关系,为了提高系统的可观测性,可由量测数据利用最小二乘法反演出,所以不把磁矩引入状态模型中.

采用单个椭球体模型作为非合作磁性目标磁场模型, 则量测模型为

$$\mathbf{B}_k = \mathbf{A}_k \mathbf{m}_k + \mathbf{w}_k, \quad (4)$$

式中, $\mathbf{B}_k$ 为 k 时刻的量测数据 (当前量测数据), $\mathbf{m}_k$ 为 k 时刻的磁矩, $\mathbf{w}_k$ 为 k 时刻的量测噪声, $\mathbf{A}_k$ 为 k 时刻的观测矩阵, 其每个元素由 (2) 式计算.

可以看出, 状态模型和量测模型都是非线性的. 定义 k 时刻的状态向量

$$\mathbf{x}_k = (x_k, y_k, z_k, \theta_k, v_k, L_k)^T,$$

将上述的状态模型和量测模型写成如下的标准形式

$$\begin{cases} \mathbf{x}_k = \mathbf{f}_k(\mathbf{x}_{k-1}, \boldsymbol{\varepsilon}_{k-1}) \\ \mathbf{B}_k = \mathbf{h}_k(\mathbf{x}_k, \boldsymbol{\omega}_k) \end{cases}. \quad (5)$$

实时磁定位的主要任务是由当前及以往量测数据 $\mathbf{B}_{1:k}$ 利用 UPF 算法实时估计 k 时刻的状态向量 $\mathbf{x}_k$.

3.2 UPF 算法

粒子滤波是利用一系列带权值的空间随机采样的粒子来逼近后验概率密度函数, 是一种基于蒙特卡罗的贝叶斯估计方法. 粒子滤波不受非线性、非高斯系统的限制^[12], 适用于任何环境下的任何状态和量测模型, 目前被广泛应用于多个领域^[13-18]. 但传统的粒子滤波算法忽略了每个采样时刻量测数据对状态估计的修正作用, 可能存在粒子退化现象, 并最终导致滤波发散.

UPF 算法的核心思想就是在粒子滤波算法的基础上, 利用不敏卡尔曼滤波 (unscented Kalman filter, UKF) 得到比粒子滤波更好的重要性函数 $q(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{B}_k)$, 每一次采样后的粒子都由 UKF 进行更新, 所得均值和协方差用于下次采样. 由于 UKF 充分利用了最新的量测信息且具有重尾特点, 因此基于 UKF 的粒子滤波方法 UPF 具有更好的滤波效果. UPF 算法的步骤如下.

1) $k = 0$ 时刻, 初始化

从先验概率密度函数 $p(\mathbf{x}_0)$ 中抽取 N 个粒子 $\mathbf{x}_0^{(i)}$, 并置初始权重 $w_0^i = 1/N$, 其中 $i = 1, 2, \dots, N$.

2) 当 $k = 1, 2, \dots$ 时

(a) 利用 UKF 更新粒子

对每个粒子 $\mathbf{x}_{k-1}^{(i)}$ 采用 UKF 更新得到相应的均值 $\bar{\mathbf{x}}_k^{(i)}$ 和协方差 $\mathbf{P}_k^{(i)}$, 由此可以构造高斯分布的重要性函数 $q(\mathbf{x}_k^{(i)} | \mathbf{x}_{k-1}^{(i)}, \mathbf{B}_k) = N(\mathbf{x}_k^{(i)}; \bar{\mathbf{x}}_k^{(i)}, \mathbf{P}_k^{(i)})$.

(b) 计算权重

按以下两式计算并归一化权重

$$\hat{w}_k^i = w_{k-1}^i \frac{p(\mathbf{B}_k | \mathbf{x}_k^{(i)}) p(\mathbf{x}_k^{(i)} | \mathbf{x}_{k-1}^{(i)})}{q(\mathbf{x}_k^{(i)} | \mathbf{x}_{k-1}^{(i)}, \mathbf{B}_k)}, \quad (6)$$

$$w_k^i = \hat{w}_k^i / \sum_{j=1}^N \hat{w}_k^j. \quad (7)$$

(c) 重采样

计算粒子集的多样性指标

$$S = \left(\sum_{i=1}^N (w_k^i)^2 \right)^{-1}, \quad (8)$$

如果 $S > S_T$, 则认为粒子集没有退化, 此时不需要进行重采样, 否则需要重采样, S_T 为设定的阈值, 一般取 $S_T = N/2$. 重采样的具体做法为丢弃权值较小的粒子, 复制权值较大的粒子. 重采样完成后, 置权重 $w_k^i = 1/N$.

(d) 输出

输出状态估计值

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \sum_{i=1}^N w_k^i \mathbf{x}_k^{(i)}. \quad (9)$$

3.3 实时磁定位方法

传感器阵列以一定的采样周期连续测量磁场, 当有非合作磁性目标从传感器阵列上方通过时, 磁场测量数据将出现异常, 系统开始进行磁定位. 但是, 海底的传感器阵列一般布置成一条直线的形式, 其取向与航道方向大致垂直. 因而 UPF 算法直接应用到磁定位中将存在以下问题: 首先, UPF 算法中的 UKF 需要用当前量测数据 $\mathbf{B}_k$ 更新粒子状态, 而 $\mathbf{B}_k$ 并不能反映非合作磁性目标磁场的全貌, 当非合作磁性目标距离传感器较远时, $\mathbf{B}_k$ 的信噪比较小 (非合作磁性目标磁场为信号, 模型误差与量测噪声均为噪声), 在迭代计算过程中易导致粒子状态快速发散, 即使非合作磁性目标在以后时刻接近传感器, 粒子状态也难收敛, 以至于系统的可观测性较差; 其次, 非合作磁性目标的磁矩也是未知量, 如果把其作为状态变量引入状态模型中, 系统的状态向量维数就很大, 这将进一步降低系统的可观测性.

为了解决基于UPF的实时磁定位方法所存在的问题, 本文采取了以下措施.

1) 每次迭代都对由UKF更新得到的粒子状态进行约束(即把状态向量各元素限定在各自的约束范围内), 然后再进行粒子滤波中的随机采样. 由于粒子状态只能在约束范围内取值, 即使 $\mathbf{B}_k$ 的信噪比较小, 粒子状态也不易发散.

2) k 时刻的非合作磁性目标磁矩 $\mathbf{m}_k$ 由当前及以往量测数据的垂直分量 $\mathbf{B}_{z,1:k}$ 利用最小二乘法反演求出, 其反演所用的观测矩阵 $\mathbf{A}_{1:k}$ 由各时刻状态 $\mathbf{x}_{1:k}$ 根据(2)式计算得到, 而 $\mathbf{x}_{1:k}$ 是由当前状态 $\mathbf{x}_k$ 根据状态方程逐步向前推算得到. 磁矩 $\mathbf{m}_k$ 是未知量, 其与量测数据成线性关系, 因而可以利用最小二乘法反演求出, 这样减小了系统状态向量的维数, 提高了系统的可观性. 但是, 在传感器采样周期一定的情况下, 随着量测数据时刻个数的增多, 计算量逐渐增大, 因而量测数据时刻个数不能太多.

4 仿真分析

由于UPF算法中的UKF对量测数据的信噪比下降较为敏感, 当信噪比较小时, 磁定位精度将大大降低, 甚至系统不可观测. 而本文方法对粒子状态进行约束以及利用最小二乘法反演磁矩, 可以减小量测噪声对磁定位的影响.

为考察量测噪声对磁定位的影响, 设计如下仿真实验: 非合作磁性目标为单个椭球体, 焦距为20 m, 原始磁矩为 $(5000, -500, 12500)^T \text{ A}\cdot\text{m}^2$; 非合作磁性目标自 $(-49 \text{ m}, -8.7 \text{ m}, 10 \text{ m})$ 的初始位置以速度 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、航向 $10\pi/180 \text{ rad}$ 从传感器阵列上方通过; 传感器阵列包含3个传感器, 分别位于 $(0 \text{ m}, -5 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $(0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 和 $(0 \text{ m}, 5 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 的位置, 采样周期为1 s, 整个测量时间为51 s; 在航向和航速上分别叠加航向噪声和航速噪声作为实际的航向和航速, 航向噪声和航速噪声为均值为0、方差为 0.01^2 的高斯噪声; 计算目标椭球体的磁场值, 在磁场值上叠加上量测噪声作为实际的量测数据, 量测噪声为均值为0, 方差为1的高斯噪声; 滤波器的粒子数设置为20.

在量测噪声不变的情况下, 通过改变目标椭球体磁矩大小来考察量测噪声对磁定位的影响. 令 c 等于改变后的磁矩大小与原始磁矩大小之比,

图2给出了叠加量测噪声的中间传感器量测数据($c = 0.1$), 图3和图4分别给出了非合作磁性目标平面位置和垂直位置估计值与实际值的对比曲线($c = 1, c = 0.5, c = 0.1$). 由图3和图4可以看出, 稳定后的估计值与实际值符合较好, 定位精度较高, 所以量测噪声对本文磁定位的影响不大.

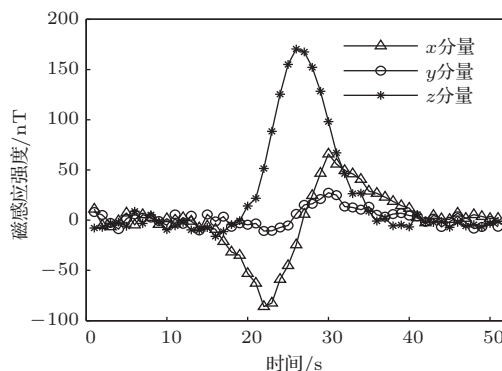


图2 叠加量测噪声的量测数据

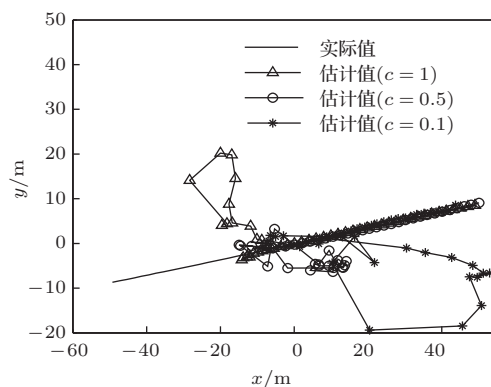


图3 平面位置估计值与实际值的对比

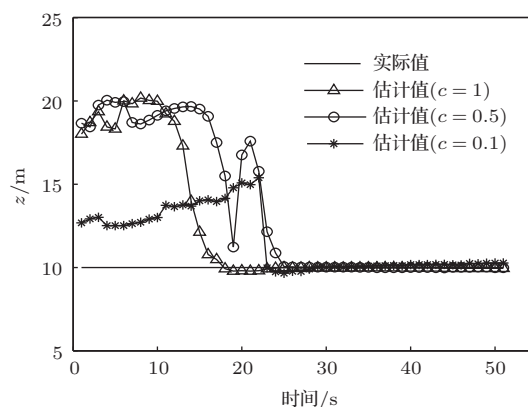


图4 垂直位置估计值与实际值的对比

5 铁磁物体定位实验

为验证方法的有效性, 采用实际的磁性物体进行磁定位实验.

如图5所示, 实验对象是长0.8 m、宽0.11 m的长方体形状的空心铁磁物体, 传感器阵列在下方进行磁场测量. 铁磁物体自 $(-2.5 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0.4 \text{ m})$ 的初始位置以速度 $0.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、航向 0 rad 从传感器阵列上方通过. 传感器阵列由3个三分量磁通门传感器组成, 分别位于 $(0 \text{ m}, -0.27 \text{ m}, 0 \text{ m})$, $(0 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 和 $(0 \text{ m}, 0.27 \text{ m}, 0 \text{ m})$ 的位置, 采样周期为1 s, 整个测量时间为41 s. 在算法中, 航向噪声的均值和方差分别设置为0和 0.01^2 , 航速噪声的均值和方差分别设置为0和 0.001^2 , 量测噪声的均值和方差分别设置为0和1. 滤波器的粒子数设置为20.

图6和图7分别给出了铁磁物体平面位置和垂直位置估计值与实际值的对比曲线. 可以看出: 系统在铁磁物体通过传感器正上方之前已输出稳定, 且定位效果较好, 说明系统对目标的定位能够尽早完成, 实时性较好; 随着铁磁物体远离传感器, 系统输出将有小幅波动, 这是由于当前量测数据的信噪比随距离增大而逐渐减小的原因.

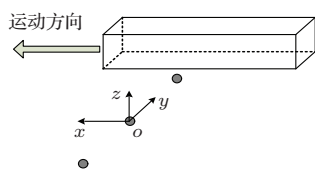


图5 实验示意图

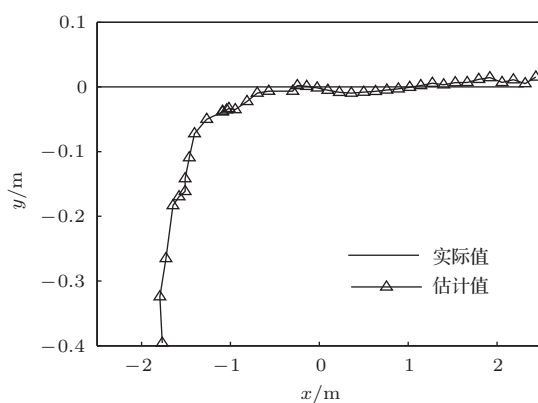


图6 平面位置估计值与实际值的对比

另外, 用单个椭球体模型模拟长方体形状的铁磁物体磁场是有一定模型误差的, 但实验结果表明模型误差对磁定位的稳定性及精度影响较小, 这是由于系统把模型误差归于量测噪声的原因. 当模型误差较大时, 可以适当增大算法中的量测噪声方差进行磁定位.

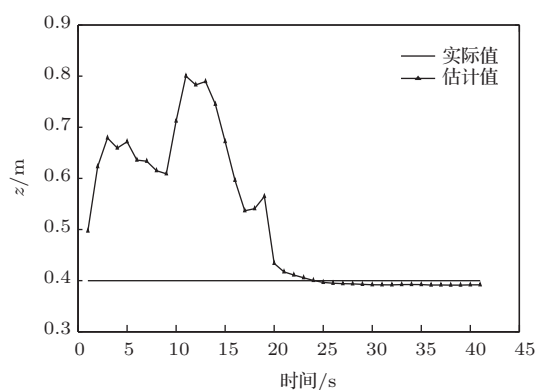


图7 垂直位置估计值与实际值的对比

6 结 论

根据水中非合作磁性目标的运动特征, 本文建立了状态空间模型, 在UPF算法的基础上对粒子状态进行约束以及利用最小二乘法反演磁矩, 提出了基于UPF的水中非合作磁性目标实时磁定位方法, 仿真与铁磁物体定位实验结果表明, 该方法的实时定位效果较好. 可得以下结论:

- 1) 量测噪声对本文磁定位的影响不大;
- 2) 由于UPF充分利用当前量测数据更新粒子状态, 所以系统对目标的定位能够尽早完成, 实时性较好;
- 3) 由于系统把模型误差归于量测噪声, 所以模型误差对本文磁定位的影响较小, 当模型误差较大时, 可以适当增大算法中的量测噪声方差进行磁定位.

参考文献

- [1] Lin C S, Gong S G 2007 *Ship Physical Field* (Beijing: The Publishing House of Ordnance Industry) p63 (in Chinese) [林春生, 龚沈光 2007 舰船物理场 (北京: 兵器工业出版社) 第63页]
- [2] Tang J F, Gong S G, Wang J G 2003 *Acta Electron. Sin.* **31** 154 (in Chinese) [唐劲飞, 龚沈光, 王金根 2003 电子学报 **31** 154]
- [3] Salem A, Ushijima K, Gamey T J, Ravat D 2001 *Subsurf. Sens. Technol. Appl.* **2** 191
- [4] Davis K, Li Y G, Nabighian M 2010 *Geophysics* **75** 13
- [5] Inaba T, Shima A, Konishi M, Yanagisawa H, Takada J I, Araki K 2002 *Electron. Commun. Jpn.* **85** 23
- [6] Birsan M 2011 *IEEE Trans. Magn.* **47** 409
- [7] Zhang Z Y, Xiao C H, Yan H 2009 *J. Detect. Control* **31** 44 (in Chinese) [张朝阳, 肖昌汉, 闫辉 2009 探测与控制学报 **31** 44]

- [8] Wang J G, Liu S D, Gong S G 2001 *Mine Warfare and Ship Self-Defence* **4** 8 (in Chinese) [王金根, 刘胜道, 龚沈光 2001 水雷战与舰船防护 **4** 8]
- [9] Hu H B, Lin C S, Wu Z G, Wang J G 2002 *J. Naval Univ. Eng.* **14** 63 (in Chinese) [胡海滨, 林春生, 吴正国, 王金根 2002 海军工程大学学报 **14** 63]
- [10] Wei Y L, Xiao C H, Chen J C, Zhou G H 2009 *J. Shanghai Jiaotong Univ.* **43** 1216 (in Chinese) [隗燕琳, 肖昌汉, 陈敬超, 周国华 2009 上海交通大学学报 **43** 1216]
- [11] Bian X Y, Li Q M, Li H 2006 *J. Detect. Control* **28** 35 (in Chinese) [边新迎, 李庆民, 李华 2006 探测与控制学报 **28** 35]
- [12] Ning X L, Wang H L, Zhang Q, Chen L H 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 4426 (in Chinese) [宁小磊, 王宏力, 张琪, 陈连华 2010 物理学报 **59** 4426]
- [13] Leng H Z, Song J Q 2013 *Chin. Phys. B* **22** 030505
- [14] Bi J, Guan W, Qi L T 2012 *Chin. Phys. B* **21** 068901
- [15] Chang C, Ansari R 2005 *IEEE Signal Proc. Lett.* **12** 242
- [16] Sheng Z, Chen J Q, Xu R H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 069301 (in Chinese) [盛峥, 陈加清, 徐如海 2012 物理学报 **61** 069301]
- [17] Leng H Z, Song J Q, Cao X Q, Yang J H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 070501 (in Chinese) [冷洪泽, 宋君强, 曹小群, 杨锦辉 2012 物理学报 **61** 070501]
- [18] Du Z C, Tang B, Liu L X 2006 *Chin. Phys. B* **15** 2481

A real-time magnetic localization method of underwater non-cooperative magnetic targets based on unscented particle filter*

Yao Zhen-Ning[†] Liu Da-Ming Liu Sheng-Dao Zhu Xing-Le

(College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

(Received 21 May 2014; revised manuscript received 15 July 2014)

Abstract

A real-time magnetic localization method based on unscented particle filter (UPF) is proposed to solve the problem for real-time localization of underwater non-cooperative magnetic targets. The state space model of non-cooperative magnetic targets is set up according to its motion characteristic, and the state is estimated in real time by UPF. In order to improve the observability of the system, the particle state is constrained and magnetic moment is inverted by the least square method. The simulation results and ferromagnetic object localization experimental results show that the method is good in localization precision and real-time performance, which can be applied to the real-time magnetic localization in near field.

Keywords: magnetic localization, spheroid model, state space model, unscented particle filter

PACS: 75.40.Mg, 02.50.-r

DOI: 10.7498/aps.63.227502

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51377165, 51107145).

† Corresponding author. E-mail: yaozhenning1987@163.com