

# 乘性噪声背景下基于非线性渐消滤波的单信标测距定位算法

朱子尧\* 韩树平 郭正东 刘建波  
(海军潜艇学院 青岛 266044)

**摘要:** 针对基于加性噪声模型的单信标测距定位算法不能精确表征距离观测量的实际特征, 存在模型失配的问题, 该文给出一种考虑乘性噪声特性的联合最小二乘法和非线性渐消滤波的两步定位算法。在分析有效声速误差与距离观测量乘性噪声内在联系的基础上, 建立了乘性噪声背景下的测距误差模型, 通过引入一种新的弱化因子计算方法对乘性噪声背景下带单重渐消因子的非线性渐消滤波算法进行了改进, 利用基于最小二乘法的预定位过程解决改进算法对初值敏感的问题。仿真及试验数据表明该算法在水下航行器接近信标的态势下定位精度明显优于加性噪声背景下的扩展卡尔曼滤波算法。

**关键词:** 单信标测距定位; 乘性噪声; 渐消因子; 非线性滤波; 有效声速

中图分类号: TB568

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)01-0165-07

DOI: 10.11999/JEIT180239

## Single Beacon Location Algorithm Based on Nonlinear Fading Filter Under Multiplicative Noise Background

ZHU Ziyao HAN Shuping GUO Zhengdong LIU Jianbo  
(Navy Submarine Academy, Qingdao 266044, China)

**Abstract:** Single beacon location algorithm based on additive noise model can not accurately represent the actual characteristics of distance measurement, leading to a problem of model mismatch. A two step location algorithm considering the multiplicative noise characteristics is presented, which combines least squares algorithm and nonlinear fading filter. A range error model in the background of multiplicative noise is established based on the analysis of the effective sound velocity error. The nonlinear fading filtering algorithm with single fading factor under multiplicative noise background is improved by introducing the attenuation factor which increases the track continuity. Using the least squares based pre-location process to solve the problem that the improved algorithm is sensitive to the initial value. The simulation and experimental data show that the location precision of the proposed algorithm is obviously better than the extended Kalman filtering algorithm under the additive noise background.

**Key words:** Single beacon localization; Multiplicative noise; Fading factor; Nonlinear filtering; Effective sound speed

### 1 引言

声波是水下唯一可以进行远距离传播的信号形式, 利用声波在水下提供定位服务是当前的研究热点。由于长基线定位系统需要布放多个信标, 布放成本高, 有效作用范围又仅为信标阵内的区域, 在实际应用中受到诸多限制<sup>[1]</sup>。为降低应用成本, 拓展作用范围, 国内外学者对仅利用单个信标的水声测距定位系统开展了广泛研究。文献[2]基于航位推算轨迹平移策略和最小二乘法确定水下航行器初始位置。文献[3]利用粒子滤波和扩展卡尔曼滤波实现

了单信标测距定位。文献[4]利用信息滤波方法实现了一种单信标同步式测距定位系统。文献[5]对惯性导航和单信标测距定位的组合导航系统进行了研究。文献[6]通过适当增加对角元使得系数矩阵正定的方法解决了线性迭代方法在水下航行器直线航迹下定位误差增大的问题。但是, 这些方法对距离观测量的建模仅考虑了简单的加性噪声, 并未考虑距离观测误差随距离增大而增大的乘性噪声特性。文献[7]用实验结果说明在测距定位系统中与加性噪声相比乘性噪声不可忽略, 并针对乘性噪声模型下的目标跟踪问题提出一种卡尔曼滤波(KF)与极大似然估计(MLE)相结合的算法。文献[8]推导了乘性噪声模型下测距定位系统的克拉美罗下界, 并用试验

收稿日期: 2018-03-16; 改回日期: 2018-07-17; 网络出版: 2018-07-30

\*通信作者: 朱子尧 zzylecture@163.com

验证了乘性噪声模型。文献[9]提出一类带乘性噪声的非线性系统的渐消滤波算法。文献[10]提出的迭代MEKF滤波算法有效克服了乘性噪声对卫星姿态估计精度的影响。文献[11]探索了渐消滤波算法在定位跟踪领域的应用。

本文对单信标水声测距定位系统中的距离观测模型进行了分析,指出其乘性噪声的影响因素;对带乘性噪声的非线性渐消滤波算法进行了改进,通过引入弱化因子增加航迹连续的约束条件,避免距离观测值的粗差引起航迹跳变;通过一种基于最小二乘原理的初始位置确定方法进行预定位,解决改进的非线性渐消滤波算法(Improved Suboptimal Fading EKF, ISFEKF)对初值敏感的问题并将乘性噪声均值的预先估计值传递给ISFEKF算法以提高定位精度。仿真和试验数据验证了本文提出的这种联合最小二乘法和非线性渐消滤波的单信标测距定位算法(LS-ISFEKF)的有效性和鲁棒性。

## 2 水下单信标测距定位模型

### 2.1 定位原理

单信标测距定位系统中,信标通过锚系固定在水下某个位置,布放时对其进行精确授时和定位,水下航行器经过时通过测量水声信号的传播时间求得信标的距离,结合自身航迹推算实现对自身的定位。由于信标发射深度和航行器航行深度已知,因此定位问题可以简化在 $XOY$ 平面上进行,定位模型示意图如图1所示。建立以信标位置为原点的笛卡尔坐标系,水下航行器接收到两次以上导航信号时,定位模型如式(1):

$$\left. \begin{aligned} x_i^2 + y_i^2 &= r_i^2 \\ x_{i+1}^2 + y_{i+1}^2 &= r_{i+1}^2 \\ x_{i+1} &= x_i + dx(i) \\ y_{i+1} &= y_i + dy(i) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中,  $(x_i, y_i)$  为第 $i$ 次测距定位时航行器坐标,  $r_i$  为信标与航行器之间斜距在 $XOY$ 平面的投影,  $dx(i)$ ,

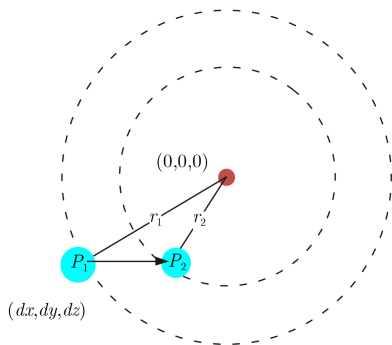


图1 水下单信标同步式测距定位模型

$dy(i)$  分别为水下航行器从 $i$ 到 $i+1$ 时刻在 $x$ 轴和 $y$ 轴方向上的位移累积量,由水下航行器航位推算系统(Dead Reckoning, DR)提供。求解式(1)即可得到航行器位置,但是式(1)存在两个解的可能。当掌握方位信息时,可以通过方位信息排除掉一个解,由于本文假设航行器不掌握方位信息,则需要进行一次变向机动排除掉一个解。此外,测距误差的存在使得直接求解式(1)常常无解,通常采用最小二乘法 and 卡尔曼滤波等方法对上述定位模型进行滤波估计。

### 2.2 测量模型

在水声定位系统中,分层介质中声线传播弯曲的现象以及多途效应使得声速值难以确定,通常采用计算收发两点间有效声速的方法对声速误差进行修正[12],若水下航行器定深航行,可以近似认为不同水平距离处对应的有效声速围绕着某一均值波动。此时可以建立如式(2)所示声速误差模型。

$$c = c' + \Delta c + \delta c \quad (2)$$

式中,  $c$  为水下航行器掌握的当前海区平均声速经验信息,  $c'$  为真实有效声速,两者之间的误差可以看作系统误差 $\Delta c$ 叠加随机误差 $\delta c$ 。这个系统误差 $\Delta c$ 等效认为是时延测距使用的声速值 $c$ 与实际有效声速分布均值的差值,在一定空间范围内可以认为是慢变的恒值常量,而随机误差 $\delta c$ 随水平距离变化。

基于这一声速误差模型,第 $i$ 次测距得到真实斜距应当为

$$R'_i = (c - \delta c_i - \Delta c) \cdot \tau_i + n_i \quad (3)$$

式中,  $\delta c_i$  为均值为0,方差为 $\sigma_c^2$ 的高斯噪声,  $n_i$  为深度传感器测量不准等因素引入的随机测距误差,服从均值为0,方差为 $\sigma_n^2$ 的高斯分布。

水下航行器以平均有效声速经验值 $c$ 代入计算得到的斜距为

$$\begin{aligned} R_i &= R'_i + (\delta c_i + \Delta c) \cdot \tau_i - n_i \\ &= \left(1 + \frac{(\delta c_i + \Delta c)}{c}\right) R'_i - n_i \\ &= (1 + \alpha_i) R'_i - n_i = R'_i + u_i \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $u_i$  为距离观测量中含有的误差,其大小为

$$u_i = \alpha_i R'_i - n_i \quad (5)$$

由此可得,定位系统的距离观测量不仅含有加性噪声 $n_i$ 还有乘性噪声 $\alpha_i$ ,  $\alpha_i$ 服从均值为 $\Delta c/c'$ ,方差为 $(\sigma_c/c')^2$ 的高斯分布,总的测距误差 $u_i$ 服从均值为 $(\Delta c/c') R'_i$ ,方差为 $(R'_i/c')^2 \sigma_c^2 + \sigma_n^2$ 的高斯噪

声。因此,总的测距误差的均值和方差均依赖于信标与水下航行器之间的真实斜距 $R'_i$ ,这也与距离越远测距误差越大的实际情况相符。

### 3 基于乘性噪声模型的非线性定位滤波算法

对于式(1)所表征的定位模型,由于量测方程为非线性,通常采用扩展卡尔曼滤波(EKF)等非线性滤波算法进行求解。但是这些算法针对的是加性噪声模型,没有考虑乘性噪声的影响。当声速误差较大时,观测中乘性噪声的影响会加大,此时再用加性噪声模型进行建模会存在较大的误差。针对带乘性噪声的非线性系统已经有了相关研究,本文在这些研究基础上提出一种乘性噪声背景下结合最小二乘法(LS)和改进的非线性渐消滤波(ISFEKF)的单信标测距定位算法(LS-ISFEKF),算法共分两个阶段,下面分别论述。

#### 3.1 预定位

由于非线性定位滤波算法对系统状态初值敏感,当状态初值误差较大时,定位性能会明显下降。而利用水声信标定位的目的是为了消除DR系统累积误差的影响,通常情况下状态初值都带有较大的误差。最小二乘法在NLOS环境下的定位性能已经得到了验证<sup>[13]</sup>,其不需要掌握噪声的先验信息,对状态初值误差不敏感,但是精度不高,适合于进行粗略的预定位。并且,乘性噪声统计特性往往未知,利用最小二乘法还可以对测量噪声的统计特性进行预先估计<sup>[7]</sup>,提高后续滤波模型的与实际环境的匹配程度。因此,本文设计的定位算法首先利用最小二乘原理对初始状态进行预估计。

由于声速误差的存在以及航行器不掌握信标的方位信息,因此航行器的第1次接收到水声导航信号的起始点可能位于图2所示的圆环区域上任意一点。同心圆环的大小由有效声速误差的上下限决定。设有效声速分布范围为 $[C_{\min}, C_{\max}]$ 。由声场仿真可知,绝大多数有效声速值落在 $[1300, 1550]$ 内。在不掌握声速剖面信息时,可以用这一范围进

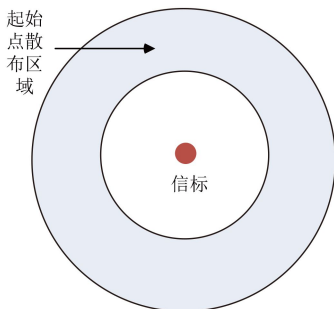


图2 航迹起始点散布区域示意图

行搜索。航行器的起始点可以由初始方位值 $\theta_i$ 和初始距离 $r_i$ 表征,而初始距离 $r_i$ 的散布主要由有效声速误差 $\Delta c_i$ 决定,因此对起始点的搜索可以转化为对 $[\theta_i, \Delta c_i]$ 的2维搜索。具体算法步骤如下:

(1) 由有效声速分布范围为 $[C_{\min}, C_{\max}]$ 确定航行器起始点散布区域,并以一定的空间采样间隔确定起始点集合 $[\theta_i, \Delta c_i]$ ;

(2) 从每一个起始点 $[\theta_i, \Delta c_i]$ 出发根据DR信息进行航迹推算,计算在该条航迹上每一个接收到水声导航信号的时时刻相对于信标的距离 $r_k(\theta_i, \Delta c_i)$ ;

(3) 构建式(6)所示的基于传播时间匹配的代价函数,每接收到一个新的水声导航信号进行一次计算:

$$L(\theta_i, \Delta c_i) = \sum_{k=1}^N [r_k(\theta_i, \Delta c_i) / (c' + \Delta c_i) - \tau_i(k)]^2 \quad (6)$$

(4) 比较所有的 $L(\theta_i, \Delta c_i)$ ,确定出 $L(\theta_i, \Delta c_i)$ 最小值对应的起始点 $[\theta_i, \Delta c_i]$ ,以该起点出发的航迹推算航迹作为当前算法给出的航迹。

在航行器进行变向机动之前,由于定位模型的多解问题,可能会存在搜索到另外一个解的可能,需要对定位结果进行收敛条件判断以保证预定位的结果可靠,收敛条件为:

(1) 在预定位过程中航行器进行了一次变向机动;  
(2) 变向机动后,连续 $K$ 个预定位结果的变化量 $\Delta d_i(k)$ 小于预先设定的阈值 $D$ 。

$\Delta d_i(k)$ 定义为

$$\Delta d_i(k) = \sqrt{(x'_i(0) - x_i(0))^2 + (y'_i(0) - y_i(0))^2} \quad (7)$$

式中,  $[x'_i(0), y'_i(0)]$ 为第 $k-1$ 次搜索确定的航迹起始点坐标,  $[x_i(0), y_i(0)]$ 为第 $k$ 次搜索确定的航迹起始点坐标,  $D$ 和 $K$ 可以根据实际情况预先灵活设置。

条件(1)排除了在水下航行器不掌握信标方位信息时的多解问题,变向的幅度越大,越能快速排除另外一个解。变向幅度过小时由于测距误差的影响存在区分不开两条平行航迹的可能。但受限于航行器机动性的要求,在工程实践中通常只需航向改变量大于 $10^\circ$ 即可。条件(2)确保转向后搜索结果已经稳定一段时间。满足这两个条件后可以结束预定位,转入非线性滤波跟踪阶段。

#### 3.2 改进的非线性渐消滤波定位算法(ISFEKF)

定义状态向量为 $\mathbf{X}_{i+1} = [x_{i+1}, y_{i+1}]^T$ ,建立式(8)所示状态方程。

$$\left. \begin{aligned} x_{i+1} &= x_i + dx_{i,i+1} \\ y_{i+1} &= y_i + dy_{i,i+1} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中,  $dx_{i,i+1}$ 和 $dy_{i,i+1}$ 分别为航行器两次定位之间

在 $x$ 轴和 $y$ 轴方向上的位移累积量,由DR系统提供,则输入向量为 $\mathbf{D}_i = [dx_{i,i+1}, dy_{i,i+1}]^T$ 。定义量测量为 $\mathbf{Z}_{i+1} = [r_{i+1}]$ ,量测方程为

$$\mathbf{Z}_{i+1} = \sqrt{(x_i + dx_{i,i+1})^2 + (y_i + dy_{i,i+1})^2} \quad (9)$$

滤波系统模型可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{X}_{i+1} &= \mathbf{F} \cdot \mathbf{X}_i + \mathbf{D}_i + \mathbf{G} \cdot \mathbf{w}_i \\ \mathbf{Z}_{i+1} &= \gamma_{i+1} \cdot h(\mathbf{X}_{i+1}) + v_{i+1} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式(10)满足

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{w}_i &\sim \mathbb{N}(0, \mathbf{I}_2), v_{i+1} \sim \mathbb{N}(0, \sigma_v^2), \gamma_{i+1} \sim \mathbb{N}(\mu_\gamma, \sigma_\gamma^2) \\ \text{Cov}(\mathbf{w}_i, v_{i+1}) &= \text{Cov}(\gamma_{i+1}, v_{i+1}) \\ &= \text{Cov}(\mathbf{w}_i, \gamma_{i+1}) = 0 \\ \mathbf{G}\mathbf{G}^T &= \mathbf{Q}, R = \sigma_v^2 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(10)中, $\mathbf{F}$ 为状态转移矩阵, $\mathbf{G}$ 为状态噪声驱动矩阵, $\mathbf{w}_i$ 为状态噪声矩阵, $\gamma_{i+1}$ 为乘性量测噪声序列, $v_{i+1}$ 为加性量测噪声序列,假设各项噪声互相独立。将式(10)中非线性的量测方程进行泰勒展开后保留一次项和常数项,得到

$$\mathbf{Z}_{i+1} = \gamma_{i+1} \cdot \mathbf{C}_{i+1} \times \mathbf{X}_{i+1} + \gamma_{i+1} \cdot \mathbf{d}_{i+1} + v_{i+1} \quad (12)$$

式中, $\mathbf{C}_{i+1} = \left. \frac{\partial h(\mathbf{X}_i)}{\partial \mathbf{X}_i} \right|_{\mathbf{X}_i = \mathbf{X}_{i+1|i}}$ , $\mathbf{d}_{i+1} = h(\mathbf{X}_{i+1|i}) - \mathbf{C}_{i+1} \times \mathbf{X}_{i+1|i}$ 。

建立滤波过程如下:

状态一步预测方程为

$$\mathbf{X}_{i+1|i} = \mathbf{F} \times \mathbf{X}_i + \mathbf{D}_i \quad (13)$$

状态均值为

$$\mathbf{J}_{i+1} = \mathbf{F} \times \mathbf{J}_i + \mathbf{D}_i \quad (14)$$

状态相关矩阵为

$$\mathbf{S}_{i+1} = \mathbf{F} \times \mathbf{S}_i \times \mathbf{F}^T + \mathbf{F} \times \mathbf{J}_i \times \mathbf{D}_i^T + \mathbf{D}_i \times \mathbf{J}_i^T \times \mathbf{F}^T + \mathbf{G} \times \mathbf{Q} \times \mathbf{G}^T + \mathbf{D}_i \times \mathbf{D}_i^T \quad (15)$$

输出残差为

$$\tilde{\mathbf{Z}}_{i+1} = \mathbf{Z}_{i+1} - \mu_\gamma \cdot h(\mathbf{X}_{i+1|i}) \quad (16)$$

渐消因子由式(17)确定

$$\lambda_{i+1} = \begin{cases} \lambda_0, & \lambda_0 \geq 1 \\ 1, & \lambda_0 < 1 \end{cases}, \lambda_0 = M_{i+1}/N_{i+1} \quad (17)$$

式中,

$$\begin{aligned} M_{i+1} &= V_{i+1} - \sigma_\gamma^2 \mathbf{C}_{i+1} \times \mathbf{S}_{i+1} \times \mathbf{C}_{i+1}^T \\ &\quad - \sigma_\gamma^2 \mathbf{C}_{i+1} \times \mathbf{J}_{i+1} \times \mathbf{d}_{i+1}^T - \sigma_\gamma^2 \mathbf{d}_{i+1} \times \mathbf{J}_{i+1}^T \\ &\quad \times \mathbf{C}_{i+1}^T - \sigma_\gamma^2 \mathbf{d}_{i+1} \times \mathbf{d}_{i+1}^T - \mu_\gamma^2 \mathbf{C}_{i+1} \\ &\quad \times \mathbf{G} \times \mathbf{Q} \times \mathbf{G}^T \times \mathbf{C}_{i+1}^T - R \end{aligned} \quad (18)$$

$$N_{i+1} = \mu_\gamma^2 \mathbf{C}_{i+1} \times \mathbf{F} \times \mathbf{P}_{i+1} \times \mathbf{F}^T \times \mathbf{C}_{i+1}^T \quad (19)$$

$V_{i+1}$ 可以由开窗法<sup>[14]</sup>等方法进行确定,本文算法采用文献<sup>[15]</sup>提供的遗忘因子方法进行估算

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \tilde{\mathbf{Z}}_1 \tilde{\mathbf{Z}}_1^T \\ V_{i+1} &= \frac{\rho V_i + \tilde{\mathbf{Z}}_{i+1} \tilde{\mathbf{Z}}_{i+1}^T}{1 + \rho}, \quad i > 1 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中, $0 < \rho \leq 1$ 为遗忘因子。状态预测方差阵为

$$\mathbf{P}_{i+1|i} = \lambda_{i+1} \mathbf{F} \times \mathbf{P}_i \times \mathbf{F}^T + \mathbf{G} \times \mathbf{Q} \times \mathbf{G}^T \quad (21)$$

输出残差方差为

$$\begin{aligned} R_\delta &= \sigma_\gamma^2 \mathbf{C}_{i+1} \times \mathbf{S}_{i+1} \times \mathbf{C}_{i+1}^T + \sigma_\gamma^2 \mathbf{C}_{i+1} \times \mathbf{J}_{i+1} \\ &\quad \times \mathbf{d}_{i+1}^T + \sigma_\gamma^2 \mathbf{d}_{i+1} \times \mathbf{d}_{i+1}^T + \mu_\gamma^2 \mathbf{C}_{i+1} \times \mathbf{P}_{i+1|i} \\ &\quad \times \mathbf{C}_{i+1}^T + \sigma_\gamma^2 \mathbf{d}_{i+1} \times \mathbf{J}_{i+1}^T \times \mathbf{C}_{i+1}^T + R \end{aligned} \quad (22)$$

滤波增益为

$$\mathbf{K}_{i+1} = \frac{\mu_\gamma}{R_\delta} \mathbf{P}_{i+1|i} \times \mathbf{C}_{i+1}^T \quad (23)$$

状态估计方差阵为

$$\mathbf{P}_{i+1} = (\mathbf{I} - \mu_\gamma \mathbf{K}_{i+1} \times \mathbf{C}_{i+1} \times \mathbf{P}_{i+1|i}) \quad (24)$$

状态估计为

$$\mathbf{X}_{i+1} = \mathbf{X}_{i+1|i} + \mathbf{K}_{i+1} \times \tilde{\mathbf{Z}}_{i+1} \quad (25)$$

滤波初始状态设置为: $\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ ,

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mu_\gamma = 1 + \frac{\Delta c}{c}, \sigma_\gamma = \frac{\sigma_c}{c}, \mathbf{S}_1 = \mathbf{P}_1。$$

状态向量 $\mathbf{X}_{i+1}$ 和有效声速系统误差 $\Delta c$ 由预定定位的结果确定,虽然预定定位的结果并不准确,但可以将相关估计误差约束在一定范围内,此时状态量的方差阵 $\mathbf{P}_1$ 可以设置得稍小, $\mathbf{Q}$ 和 $R$ 则根据实际情况灵活设置。

需要注意的是,以上滤波过程并未考虑水下航行器运动状态的连续性及相对位移推算的高精度,若直接利用上述强跟踪滤波算法则会存在对于当前观测值过于敏感出现位置跳变的问题,这是由于当某次观测值出现较大误差时,渐消因子会“膨胀”当前的状态预测方差阵 $\mathbf{P}_{i+1|i}$ ,造成当次滤波增益迅速增大,从而引起前后两次状态预测值的巨大差异。

文献<sup>[15]</sup>指出只有当 $V_{i+1} > R$ 时,渐消因子 $\lambda_{i+1}$ 才可能起作用,为了减弱 $\lambda_{i+1}$ 的调节强度,使状态估计值更加平滑,其在式(18)中引入了弱化因子 $\beta$ ,如式(26)所示,人为减小 $M_{i+1}$ 的值。在接近态势下,既想利用渐消滤波的遗忘特性给距离近的观测值赋予高的权值,又要考虑实际运动态势的连续性。因此,本文将弱化因子引入上述滤波过程中,将滤波过程中的式(18)由式(26)替换, $\beta_{i+1}$ 具

体取值如式(27):

$$\begin{aligned} M_{i+1} = & V_{i+1} - \sigma_\gamma^2 \mathbf{C}_{i+1} \times \mathbf{S}_{i+1} \times \mathbf{C}_{i+1}^\top \\ & - \sigma_\gamma^2 \mathbf{C}_{i+1} \times \mathbf{J}_{i+1} \times \mathbf{d}_{i+1}^\top - \sigma_\gamma^2 \mathbf{d}_{i+1} \times \mathbf{J}_{i+1}^\top \\ & \times \mathbf{C}_{i+1}^\top - \sigma_\gamma^2 \mathbf{d}_{i+1} \times \mathbf{d}_{i+1}^\top - \mu_\gamma^2 \mathbf{C}_{i+1} \\ & \times \mathbf{G} \times \mathbf{Q} \times \mathbf{G}^\top \times \mathbf{C}_{i+1}^\top - \beta_{i+1} R \end{aligned} \quad (26)$$

$$\beta_{i+1} = \mathbf{C}_{i+1} \times \mathbf{J}_{i+1} \quad (27)$$

式(27)的设置方法将距离因素引入渐消因子 $\lambda_{i+1}$ 的计算中, 减弱 $\lambda_{i+1}$ 的调节强度, 避免偶然的观测粗差造成滤波的发散, 使得模型更加符合实际情况。

## 4 仿真及试验数据处理

### 4.1 仿真算例

仿真条件: 水下航行器航速2 m/s, 航行器路径如图3中红色轨迹所示。信标坐标(0, 0), 位置如图3中绿色圆点所示。信标以10 s为间隔向外发送水声导航信号, 由于传播距离的变化, 传播时间为非等间隔, 仿真时考虑这一因素, 根据几何关系计算接收机的接收时间。设置真实声速服从均值为1500 m/s, 方差为1 m/s的高斯分布, 水下航行器掌握的海区平均声速信息为1470 m/s, 水下航行器航位推算误差服从均值为0, 方差为0.81的高斯分布, 距离观测量额外添加方差为0.49的高斯白噪

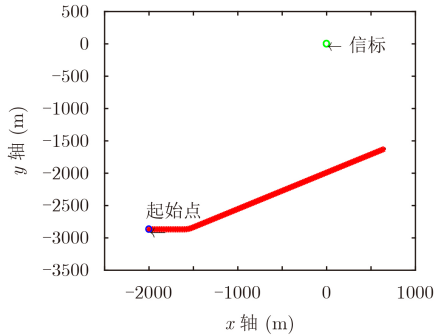
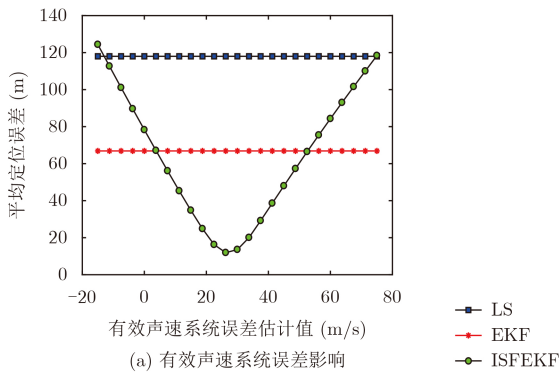
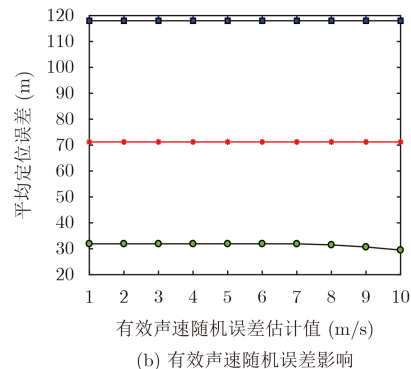


图3 水下航行器运动轨迹



(a) 有效声速系统误差影响



(b) 有效声速随机误差影响

图4 ISFEKF算法对乘性噪声参数敏感性仿真

声。仿真时间为1500 s。

滤波参数设置为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_1 = \mathbf{P}_1 = & \text{diag}([\Delta r^2, \Delta r^2]), R = 0.49, \\ Q = & \text{diag}([0.81, 0.81]), \rho = 0.95 \end{aligned} \quad (28)$$

式中,  $\Delta r$ 为仿真初始位置与真实位置的距离差。

为了考察本文提出的ISFEKF算法对滤波器乘性噪声参数设置的敏感性, 首先仿真了算法在不同有效声速系统误差估计值和随机误差估计值下的定位性能。初始位置误差设为150 m, 每一参数设置下蒙特卡洛仿真1000次, 仿真结果如图4所示, 从中可以看出ISFEKF算法定位精度受有效声速系统误差估计值的影响较大, 受有效声速随机误差估计值的影响较小。有效声速系统误差设为30 m/s(即为仿真设置的有效声速系统误差真实值)左右时定位性能最好, 但是在有效声速估计误差不超过25 m/s时相对于LS算法和加性噪声背景下的EKF算法仍具有性能优势。由于有效声速分布范围有界, 并且实际情况下经过LS算法估计有效声速系统误差后可以将有效声速系统误差约束在一个较小的范围内, 从而可以保障ISFEKF的定位精度。

预定位算法参数设置如式(29)所示, 乘性噪声参数设置如式(30)所示, 其余参数设置同式(28), 仿真比较了不同初始位置误差下LS算法、EKF算法、ISFEKF算法、最小二乘和EKF联合的LS-EKF算法以及最小二乘和ISFEKF联合的LS-ISFEKF算法的定位性能, 每一初始位置误差下蒙特卡洛仿真1000次, 仿真结果如图5所示。从中可以看出, 在初始位置误差较小时, ISFEKF定位精度最高, LS-ISFEKF次之, LS最差; 当初始位置误差逐渐增大, EKF和ISFEKF的误差逐渐增大呈发散趋势, 而LS, LS-EKF和LS-ISFEKF的定位误差基本恒定不变。仿真结果表明, LS-ISFEKF算法克服了ISFEKF算法对初始位置误差的敏感性, 改善了定位鲁棒性, 并且相对加性噪声背景下的LS-EKF

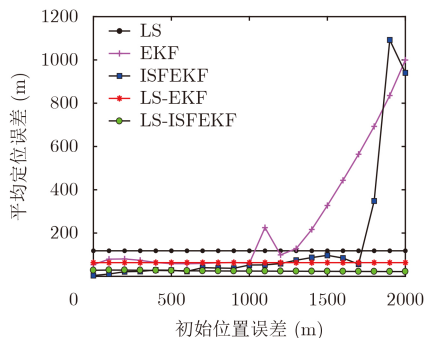


图5 定位误差比较

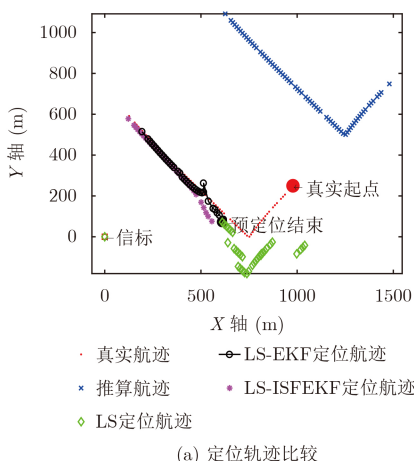
算法具有定位精度优势。

$$K = 10, D = 50 \quad (29)$$

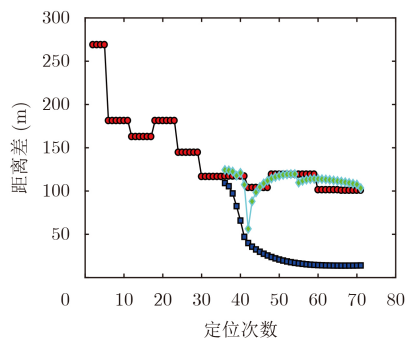
$$\mu_\gamma = 1 - \frac{1470 - 1500}{1500}, \sigma_\gamma = \frac{1}{1500} \quad (30)$$

#### 4.2 试验数据验证

为检验算法在实际应用中的性能, 2017年



(a) 定位轨迹比较



(b) 定位误差比较

图6 试验数据处理结果

算法参数设置如式(31)所示, 分别应用LS算法、LS-EKF算法和LS-ISFEKF算法对增加误差后的试验数据进行处理, 得到的定位轨迹如图6(a)所示, 定位误差如图6(b)所示。从图6(b)可以看出, LS-ISFEKF算法处理实际数据时同样取得了最佳的效果, 而LS-EKF算法的性能仅和LS算法相当。

$$K = 7, D = 50, S_1 = P_1 = \text{diag}([100^2, 100^2]),$$

$$\sigma_\gamma = \frac{5}{1500}, R = 9, Q = \text{diag}([0.81, 0.81]),$$

$$\rho = 0.95 \quad (31)$$

## 5 结论

本文提出了一种乘性噪声背景下的LS-ISFEKF算法, 仿真和实测数据验证表明: (1)算法解决了加性噪声模型与实际测距定位模型失配的问题, 减

小了单信标测距定位系统的模型误差。(2)算法采用非线性渐消滤波解决水下航行器接近信标态势下的定位问题, 提高了当前观测量的利用效率, 定位精度得到提升。(3)算法在航行器运动状态保持和距离观测量强跟踪之间进行了折中, 通过引入一种新的弱化因子计算方法, 有效改善标准非线性渐消滤波对距离观测量粗差敏感的问题。(4)算法利用LS算法进行预定位, 有效降低了ISFEKF算法对噪声和初值统计特性的敏感程度, 对于模型参数失配具有较强的鲁棒性。(5)算法缺点是需要进行一次变向机动, 这一缺点当水下航行器具备方位听测能力时可以得到解决。

## 参考文献

- [1] 孙大军, 郑翠娥. 水声导航、定位技术发展趋势探讨[J]. 海洋技术学报, 2015, 34(3): 64-68.

- SUN Dajun and ZHENG Cuie. Study on the development trend of underwater acoustic navigation and positioning technologies[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 34(3): 64-68.
- [2] 张延顺, 郭雅静, 黄小娟, 等. 水下运载体航位推算系统初始位置确定方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(12): 2211-2216.
- ZHANG Yanshun, GUO Yajing, HUANG Xiaojuan, *et al.* Method for determining initial position of dead reckoning system of underwater vehicle[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 41(12): 2211-2216.
- [3] FERREIRA B, MATOS A, and CRUZ N. Single beacon navigation: Localization and control of the MARES AUV[C]. IEEE Oceans Conference, Washington D.C., USA, 2010: 1-9.
- [4] SARAH E W. Decentralized single beacon acoustic navigation: Communication and navigation for underwater vehicles[D]. [Ph.D. dissertation], The Johns Hopkins University, 2010: 30-96.
- [5] 王彬, 翁海娜, 梁瑾. 一种惯性/水声单应答器距离组合导航方法[J]. 海洋技术学报, 2017, 25(1): 86-90.
- WANG Bin, WENG Haina, and LIANG Jin. Inertial/acoustic range integrated navigation with single transponder[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2017, 25(1): 86-90.
- [6] 曹俊, 郑翠娥, 孙大军, 等. 系数矩阵正定的单信标测距定位算法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(4): 981-988. doi: [10.11999/JEIT150483](https://doi.org/10.11999/JEIT150483).
- CAO Jun, ZHENG Cuie, SUN Dajun, *et al.* A single beacon location algorithm with positive definite coefficient matrix[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(4): 981-988. doi: [10.11999/JEIT150483](https://doi.org/10.11999/JEIT150483).
- [7] WANG Xingbo, FU Minyue, and ZHANG Huanshui. Target tracking in wireless sensor networks based on the combination of KF and MLE using distance measurements[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2012, 11(4): 567-576.
- [8] 史秀纺. 复杂因素影响下的定位跟踪问题研究[D]. [博士论文], 浙江大学, 2016: 20-67.
- SHI Xiufang. Research on localization and tracking under the influence of complex factors[D]. [Ph.D. dissertation], Zhejiang University, 2016: 20-67.
- [9] 张征. 一类带乘性噪声非线性系统的估计算法研究[D]. [硕士论文], 中国海洋大学, 2006: 40-82.
- ZHANG Zheng. Study of estimation algorithm for a class of nonlinear systems with multiplicative noise[D]. [Master dissertation], Ocean University of China, 2006: 40-82.
- [10] 王炯琦, 矫媛媛, 周海银, 等. 适合处理乘性噪声估计卫星姿态的非线性迭代滤波算法[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1417-1422.
- WANG Jiongqi, JIAO Yuanyuan, ZHOU Haiyin, *et al.* An iterative filter for nonlinear satellite attitude determination system with multiplicative stochastic matrix[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(6): 1417-1422.
- [11] 范小军, 刘锋. 一种新的机动目标跟踪的多模型算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 532-535.
- FAN Xiaojun and LIU Feng. A new IMM method for tracking maneuvering target[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(3): 532-535.
- [12] VINCENT H T. Models, algorithms and measurement for underwater acoustic positioning[D]. [Ph.D. dissertation], University of Rhode Island, 2001: 1-5.
- [13] 毛永毅, 李明远, 张宝军. 一种NLOS环境下的TOA/AOA定位算法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(1): 37-40.
- MAO Yongyi, LI Mingyuan, and ZHANG Baojun. A TOA/AOA location algorithm in NLOS environment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(1): 37-40.
- [14] 杨元喜, 高为广. 渐消滤波原理及其理论分析[J]. 测绘科学与工程, 2007, 27(2): 1-4.
- YANG Yuanxi and GAO Weiguang. Principle and theoretical analysis of fading filtering[J]. *Geomatic Science and Engineering*, 2007, 27(2): 1-4.
- [15] 周东华, 席裕康. 非线性系统带次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波[J]. 控制与决策, 1990, 5(5): 1-6.
- ZHOU Donghua and XI Yukang. Suboptimal fading extended Kalman filtering for nonlinear systems[J]. *Control & Decision*, 1990, 5(5): 1-6.
- 朱子尧: 男, 1992年生, 博士生, 研究方向为水下定位与导航、水声信号处理.
- 韩树平: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为声呐装备技术及应用、水声信号处理.
- 郭正东: 男, 1977年生, 副教授, 研究方向为水下定位与导航、水下航行器航行安全.
- 刘建波: 男, 1986年生, 博士生, 研究方向为水声通信、水声信号处理、水下定位与导航.