

# 通信延迟下的多 UUV 协同定位——基于航迹预测的实时更新算法

姚 尧, 徐德民, 张立川, 严卫生

(西北工业大学航海学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:** 研究了主从式多无人水下航行器 (UUV) 协作系统的协同定位方式, 并针对协同定位过程中存在的水声通信和探测时延问题, 提出了基于主 UUV 航迹预测的无状态逆推的非等间隔实时更新 (IIRU) 定位方法, 用于提高从 UUV 的协同定位精度. 该方法采用统计建模方法对主 UUV 航迹进行预测, 用于从 UUV 相对距离量测的实时更新, 并基于非等间隔滤波, 设计了针对不同类型传感器的实时滤波方法. 仿真结果验证了所提定位算法在存在通信时延下的有效性.

**关键词:** 无人水下航行器; 协同定位; 多 UUV; 通信延迟

中图分类号: U674.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2011)-02-0161-08

## Cooperative Localization of Multiple UUVs with Communication Delays – A Real-time Update Method Based on Path Prediction

YAO Yao, XU Demin, ZHANG Lichuan, YAN Weisheng

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** A manner of cooperative localization for master-slave multiple UUVs (unmanned underwater vehicles) is investigated. To solve the problem of acoustic communicating and measurement delay during cooperative localization, based on path prediction of master UUV, an incoordinate interval real-time update (IIRU) method without state reverse is proposed to improve the accuracy of the slave UUV localization. In order to update the relative ranging measurements in real-time, the method firstly predicts the path of the master UUV using a statistics modeling method. In addition, based on the incoordinate interval algorithm, real-time updating algorithms are designed corresponding to the different types of sensors. Simulation results prove the efficiency of the proposed method with communication delays.

**Keywords:** unmanned underwater vehicle (UUV); cooperative localization (CL); multiple UUVs; communication delay

### 1 引言 (Introduction)

多 UUV 协同定位技术已成为当前多 UUV 导航定位领域的重点研究课题. 与非水下平台的协同定位系统<sup>[1-4]</sup>相比, 多 UUV 协同定位技术的研究起步较迟, 进展较慢, 但随着各国多 UUV 平台研究的展开, 多 UUV 协同定位技术也取得了一定的成就. 从位置估计的融合算法来分, 主要可分为基于几何学的协同定位和基于概率学的协同定位.

在基于几何解算的协同定位技术研究中, 文 [5] 首次提出“移动长基线”的概念. 所谓“移动长基线”, 即通过改进传统的长基线技术, 利用无人水面舰船或水面浮标充当可移动的长基线定位基阵, 然后通过 UUV 之间的探测和定位方程的解算确定航行器的位置坐标. 随后, 基于“移动长基线”的概

念, 对 1 个 AUV (autonomous underwater vehicle) 和 1 个 ASC (autonomous surface craft) 组成的多 UUV 系统进行了协同定位的试验.

同样, 基于概率学的滤波定位算法也得到了研究人员的关注.

MIT 的“CADRE”<sup>[6]</sup>系统采用通信导航辅助的多 UUV 协同定位<sup>[7]</sup>方法, 该多 UUV 系统拥有一些专门用于通信和导航辅助的航行器 C/NA UUV. C/NA UUV 携带有高精度的 INS (惯导系统) 和 DVL (多普勒测速仪), 用于多 UUV 系统中其它低精度的航行器的通信和定位. 该定位算法中, UUV 以 2 个时刻下 UUV 自身和 C/NA 之间的相对距离为观测测量, 并融合 UUV 和 C/NA 自测的航行位移信息, 进行 EKF (扩展卡尔曼滤波器) 滤波, 解算 UUV 的

位置和定位方差,从而完成多UUV的精确定位。

文[8-9]基于WHOI公司的微型同步钟水声Modem(调制解调器),首先设计了水声时延(TOF)测距和广播通信下的最大似然定位算法,进而研究了适用于航程超过100km的多UUV导航定位方法,并进行了相关试验。此外,部分研究学者也针对卡尔曼协同定位滤波算法中存在的量测信息重用问题<sup>[10-11]</sup>进行了研究。

多UUV协同定位系统很大程度上依赖于彼此间的通信、探测和信息共享来提高定位精度。由于水下环境的特殊性以及电磁波在水中的快速衰减,水声通信成为目前水下唯一有效的通信方式,但存在不可避免的通信延迟、带宽受限、通信距离受限等固有问题。

由前文所述当前多UUV协同定位技术的发展可以看出,目前研究大多专注于不同UUV组合下基本滤波算法的仿真和试验研究,甚少研究考虑了水声通信及探测方式以及不可避免的通信延迟对多UUV协同定位系统的作用和影响。

文[12]研究了测距时延下的协同定位算法,存储过去时刻信息进行量测更新,进而预测到当前时刻并取代已有状态,该方法未考虑信息间的相关性。文[13]采用状态逆推的方法,考虑了信息间的相关性,设计了基于EKF的延迟滤波器DEKF(分解式扩展卡尔曼滤波器),一定程度上解决了量测延迟问题,但仍存在如下问题:一是由于该滤波器充分考虑了信息的相关性导致其过于保守,即估计的状态方差远大于系统的实际方差;二是在状态逆推过程中需要存储过去时刻的状态信息,增加了算法的存储量;三是当通信丢包时算法不可用。

本文针对多UUV协同定位过程中不可忽略的通信和探测时延问题进行了深入研究,主要贡献如下:

1) 设计了基于同步钟的分时探测和通信的主从式多UUV协作方式。

2) 对协同定位过程中不可忽略的通信和探测延迟问题进行了分析和建模。

3) 针对协同定位过程中的时延问题,提出了无状态逆推的非等间隔实时更新(IIRU)定位方法。核心思想是采用统计建模方法在从UUV滤波中心对主UUV航迹进行预测,用于相对距离量测的实时更新;并基于非等间隔滤波,设计了针对不同类型传感器的实时滤波算法。

4) 对IIRU定位方法进行了深入的分析和讨论,并通过一系列的仿真研究对此算法进行验证。

## 2 问题描述(Problem statement)

### 2.1 多UUV协作方式

最有效的协同定位方式为“主从式”(又称领航式),即由一个携带有“高精SINS(捷联惯性导航系统)+DVL(多普勒测速仪)”组合导航设备的领航主UUV担任领导者,而在从UUV上装备低成本、低精度的INS系统,UUV之间通过探测和通信,共享信息,以提高自身定位精度。

考虑到实际工程应用:1)主UUV携带有高精度、高可靠性的传感器,且携带有更充足的电源;2)无论是通信还是探测,发射声波的一方比接收声波的一方消耗更多的能源;3)同时发射探测波和通信波会造成相互干扰,且探测波和通信波不可由同一装置发出;4)与水声探测过程中的时延相比,水声通信由于低传输率的影响导致数据包的发送、传输和接收产生更长的时延;5)UUV上的同步钟装置可使UUV通过声脉冲的单路传播时间(OWTT)进行测距。基于上述考虑,本文设计配有同步钟装置的定位系统,与文[7]所设计的基于通信时间差的测距不同,本文设计探测、通信分时分地的工作模式,即主UUV以预先约定的时间间隔 $T$ 向外发射固定频率的声信号脉冲,间隔一预定时延后,通过水声Modem将自身位置、方差及传感器信息广播出去。从UUV检测到声信号脉冲或收到主UUV的广播通信包后进行相应的实时滤波和估计,以提高定位精度。

本文符号说明:1)变量上方带有“ $\sim$ ”表示为误差值,“ $\hat{\cdot}$ ”表示为估计值;2)变量下标带有 $m$ 表示为主(master)UUV相关变量,下标带有 $s$ 表示为从(slave)UUV相关变量, $\mathbf{X}_m$ 表示主UUV的状态值。

### 2.2 多UUV运动学建模

UUV航行于水下3维空间中,3个位置状态分别表示UUV的经度、纬度和深度,由于深度信息可由深度传感器直接获得,为简化运动模型,本文考虑定深航行下的多UUV定位,则2维离散运动学模型如下(3维运动学模型可在此基础上类推):

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + \Delta t \cdot V(k) \cdot \cos \theta(k) \\ y(k+1) = y(k) + \Delta t \cdot V(k) \cdot \sin \theta(k) \\ \theta(k+1) = \theta(k) + \Delta t \cdot w(k) \end{cases} \quad (1)$$

定义状态 $\mathbf{X}(k) = [x(k), y(k), \theta(k)]^T$ ,分别表示 $t_k$ 时刻UUV的经、纬度及偏航角,输入 $\mathbf{u}(k) = [V(k), w(k)]^T$ 为航行器的前向合成速度和角速度测量值,

遭受零均值高斯白噪声  $\boldsymbol{\omega}(k)$  干扰, 噪声协方差为  $\boldsymbol{Q}(k)$ , 则 UUV 的运动学模型可简写为

$$\boldsymbol{X}(k+1) = f(\boldsymbol{X}(k), \boldsymbol{u}(k), \boldsymbol{\omega}(k)) \quad (2)$$

进而可得 UUV 的线性化误差方程为

$$\tilde{\boldsymbol{X}}(k+1) = \boldsymbol{\Phi}(k+1, k) \cdot \tilde{\boldsymbol{X}}(k) + \boldsymbol{\Gamma}(k) \cdot \boldsymbol{\omega}(k)$$

其中  $\boldsymbol{\Phi}(k+1, k)$  和  $\boldsymbol{\Gamma}(k)$  为  $f$  关于状态和输入噪声的雅可比矩阵, 具体参考文 [13].

### 2.3 水声测距建模

$t_k$  时刻, 从 UUV 接收到主 UUV 于  $t_l$  时刻发出的声信号脉冲, 根据声脉冲的 OWTT 可解算出相对距离信息, 测距方程如下:

$$Z_{sm}(k, l) = \sqrt{(x_m(l) - x_s(k))^2 + (y_m(l) - y_s(k))^2} + v(k) \quad (3)$$

其中, 量测噪声  $v(k)$  服从方差为  $R(k)$  的高斯白噪声分布. 量测误差方程为

$$\tilde{Z}_{sm}(k, l) = \boldsymbol{h}_m \boldsymbol{X}_m(l) + \boldsymbol{h}_s \boldsymbol{X}_s(k) + v(k) \quad (4)$$

其中  $\boldsymbol{h}_m$  和  $\boldsymbol{h}_s$  分别为距离量测关于主、从状态的雅可比矩阵, 具体参考文 [13].

### 2.4 水声时延建模

多 UUV 协同定位过程中的水声探测和通信时延模型如下:

$$\text{探测时延为} \quad \tau_{\text{mea}} = \tau_{\alpha} + \tau_c$$

$$\text{通信时延为} \quad \tau_{\text{com}} = \tau_{\alpha} + \tau_{\beta}$$

其中,  $\tau_{\alpha}$  为声波在水中的传播时间,  $\tau_c$  为测距过程中的处理时延,  $\tau_{\beta}$  为水声通信非传播时延部分, 包括通信包的发送、接收及处理时延.

### 2.5 时延问题描述

由前文可知, 协同定位过程中同时存在通信和探测时延, 若在设计定位算法时将时延忽略, 则会导致定位性能的降低. 水声通信由于信息包的发送、传输和接收会产生比水声探测延迟更长的时间延迟, 除此之外, 还可能出现通信包的出序到达情况. 如图 1(b) 所示, 即主 UUV 于  $t_l$  时刻广播的通信包在其  $t_l + T$  时刻广播的通信包之后被从 UUV 接收到.

后文将针对多 UUV 协同定位中的探测和通信延迟问题, 研究相应的定位方法.

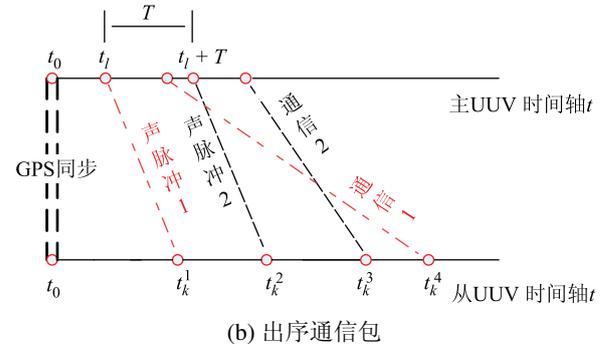
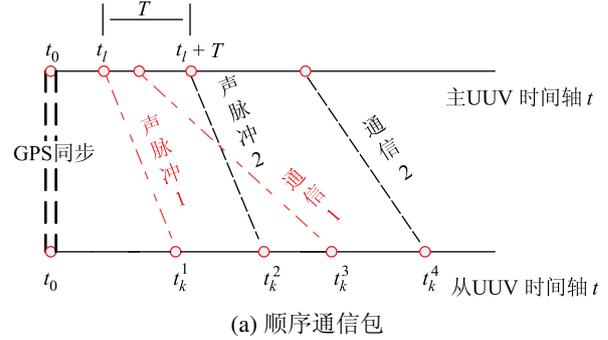


图1 探测及通信时刻表

Fig.1 Schedule of measuring and communicating

## 3 非等间隔实时更新协同定位 (Incoordinate interval real-time update method for cooperative localization)

标准卡尔曼滤波算法中个别量测延迟到达的问题, 已有若干学者进行了相关研究, 包括量测外推<sup>[14]</sup>、状态扩增、新息重建<sup>[15]</sup>以及建立平行延迟滤波器<sup>[16-17]</sup>等. 本文针对多 UUV 协同定位过程中的通信及测距延迟问题, 建立了主 UUV 的航迹预测递推模型, 并提出了通信延迟下的 IIRU 协同定位算法.

从 UUV 定位过程中存在两类固定周期的采样, 一是从 UUV 自身的低精度 INS 采样周期  $\Delta t$  (由 2.2 节可知), 二是主 UUV 的探测和通信周期  $T$ . 此外, 由于从 UUV 检测到声脉冲信号和接收到通信包的时间不确定且无周期性, 因此从 UUV 的定位过程中除了存在两类固定周期的采样外, 还存在两类非固定周期的采样过程. 基于此, 设计如下基于主 UUV 预测航迹的非等间隔的滤波算法. 根据  $t_{k+1}$  时刻从 UUV 获得的传感器信息, 分为如下 3 种情形:

Case 1:

- 内部传感器信息: 从 UUV 自导航传感器信息;
- 外部传感器信息: 无.

Case 2:

- 内部传感器信息: 从 UUV 自导航传感器信息;

b) 外部传感器信息:  $t_l$  时刻主 UUV 发出的声脉冲信号.

Case 3:

- a) 内部传感器信息: 从 UUV 自导航传感器信息;
- b) 外部传感器信息:  $t_r$  时刻主 UUV 的广播通信包.

下文将分别针对上述 3 种情形设计基于主 UUV 航迹预测的非等间隔实时更新定位算法, 首先设计主 UUV 航迹预测算法.

3.1 主 UUV 航迹预测

建立主 UUV 的航迹预测模型, 定义其状态为  $\mathbf{X}_m = [x_m, y_m, \theta_m]^T$ , 则运动模型为

$$\mathbf{X}_m(l+1) = f(\mathbf{X}_m(l), \mathbf{u}_m(l), \mathbf{w}_m(l)) \quad (5)$$

考虑到 UUV 的航行特征, 本文假设主 UUV 做匀速航行运动, 且无较大机动性, 则可将角速度变量视为随机噪声并进行统计建模. 由于输入噪声  $w$  只与状态子空间  $\{\theta\}$  有关, 而在距离观测下, 由偏航角  $\theta$  组成的状态子空间是不可观测的<sup>[18]</sup>, 因此基于距离观测的 Sage-Husa<sup>[19]</sup> 自适应滤波不能解决当前所面临的  $w$  统计状态未知问题. 基于此, 本文设计了如下噪声统计估计器.

假设由通信包所获得的主 UUV 角速度集合为  $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ , 将其视为服从总体分布  $N(\mu_w, P_w)$  的样本值, 则由随机变量总体分布理论<sup>[20]</sup> 可知, 均值  $\mu_w$  和方差  $P_w$  的最大似然估计为

$$\mu_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i = \bar{w} \quad (6)$$

$$P_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (w_i - \bar{w})^2 \quad (7)$$

为使新的测量值对估计量的修正起更大作用, 设计如下自适应统计估计器.

为描述方便, 用  $\bar{w}_n$  和  $P_n^w$  分别表示样本容量为  $n$ 、样本值为  $[w_1, w_2, \dots, w_n]^T$  时的估计均值和方差, 则

$$\bar{w}_n = \sum_{i=1}^n d_n b^{n-i} w_i \quad (8)$$

$$P_n^w = \sum_{i=1}^n d_n b^{n-i} (w_i - \bar{w}_n)^2 \quad (9)$$

其中  $d_n = \frac{1-b}{1-b^n}$ ,  $b$  为衰退因子,  $0 < b < 1$ .

随着时间的增长, 越来越多的主 UUV 通信包到达, 样本容量  $n$  越来越大, 若使用式 (8)、(9) 所示的估计器, 则需要较大的存储容量和计算能力, 显

然是不经济的, 为此, 设计如下递推式估计器:

$$\begin{aligned} \bar{w}_{n+1} &= (1 - d_{n+1})\bar{w}_n + d_{n+1}w_{n+1} \\ P_{n+1}^w &= (1 - d_{n+1})P_n^w + (1 - d_{n+1})d_{n+1}(w_{n+1} - \bar{w}_n)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

由于篇幅限制, 推导过程省略.

则主 UUV 航迹预测模型为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_m(l+1) &= f(\hat{\mathbf{X}}_m(l), \mathbf{V}_m(l), \hat{w}_m(l)) \\ \mathbf{P}_m(l+1) &= \Phi_m(l+1, l) \cdot \mathbf{P}_m(l) \cdot \Phi_m^T(l+1, l) + \Gamma_m(l) \cdot \mathbf{Q}_m(l) \cdot \Gamma_m^T(l) \end{aligned} \quad (11)$$

其中  $\hat{w}_m(l)$  由式 (10) 推导得到.

3.2 Case 1: 无外部传感器信息

在无外部传感器信息情况下, 从 UUV 滤波系统只进行时间更新. 考虑到主、从 UUV 状态之间的耦合性, 将从 UUV 状态进行扩增, 又因水声探测存在时延, 为了在探测波到达后进行实时的量测更新, 定义如下切换式扩增状态, 则此时的时间更新算法如下: 若已检测到的最近到达的声脉冲的发出时间为  $t_l$ , 定义  $t_{l+N} = t_l + T$ , 则

1) 当  $t_{k+1} \leq t_{l+N}$  时,

$$\hat{\mathbf{X}}_s^A(k+1) = \begin{bmatrix} f(\hat{\mathbf{X}}_s(k), \mathbf{u}_s(k)) \\ f(\hat{\mathbf{X}}_m(k), \mathbf{V}_m(k), \hat{w}_m(k)) \end{bmatrix} \quad (12)$$

即主、从 UUV 状态和方差同时进行时间更新.

2) 当  $t_{k+1} > t_{l+N}$  时,

$$\hat{\mathbf{X}}_s^A(k+1) = \begin{bmatrix} f(\hat{\mathbf{X}}_s(k), \mathbf{u}_s(k)) \\ \hat{\mathbf{X}}_m(l+N) \end{bmatrix} \quad (13)$$

即此时仅从 UUV 状态和方差进行时间更新, 主 UUV 状态保持不变. 方差更新为相应的卡尔曼滤波器的预测方差更新, 不再列出.

3.3 Case 2: 检测到声脉冲信号

从 UUV 检测到  $t_l$  时刻主 UUV 发出的声脉冲后, 可由测得的传输时间差减去已知时延  $\tau_c$  得到真正的传输时间差, 从而获得相对距离  $Z_{sm}(k+1, l)$ , 滤波算法如下:

1) 时间更新过程

当前时刻满足条件  $t_{k+1} > t_l$ , 则时间更新过程如式 (13).

2) 量测更新过程

由量测方程 (4) 知, 此时的相对距离量测与  $t_l$  时刻的主 UUV 状态有关, 然而由于水声通信时延, 无法实时获得  $t_l$  时刻的主 UUV 状态. 针对此问题, 本文建立了主 UUV 的航迹预测模型 (11), 以满足量测

实时更新的需要. 量测更新如下:

$$\mathbf{H}(k+1) = [\mathbf{h}_s(k+1), \mathbf{h}_m(l)] \quad (14)$$

$$\mathbf{Z}_1(k+1) = \mathbf{Z}_{sm}(k+1, l) - \mathbf{h}_m(l)\mathbf{X}_m(l) - \mathbf{h}_s(k+1)\mathbf{X}_s(k+1, k) \quad (15)$$

$$\mathbf{S}(k+1) = \mathbf{h}_s(k+1)\mathbf{P}_s(k+1, k)\mathbf{h}_s^T(k+1) + \mathbf{h}_m(l)\mathbf{P}_m(l)\mathbf{h}_m^T(l) + \mathbf{R}(k+1) \quad (16)$$

$$\mathbf{K}(k+1) = \mathbf{P}_s^A(k+1, k)\mathbf{H}^T(k+1)\mathbf{S}^{-1}(k+1) \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_s^A(k+1) &= \hat{\mathbf{X}}_s^A(k+1, k) + \mathbf{K}(k+1)\mathbf{Z}_1(k+1) \\ \mathbf{P}_s^A(k+1) &= [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k+1)\mathbf{H}(k+1)]\mathbf{P}_s^A(k+1, k) \end{aligned} \quad (18)$$

其中式 (15) 和 (16) 计算新息和方差,  $\mathbf{R}$  表示观测值  $Z$  的观测误差协方差, 式 (17) 计算滤波增益, 式 (18) 更新状态和方差.

### 3) 扩增状态的切换

量测更新完成后, 将延迟的主 UUV 状态预测到当前时刻, 即切换扩增状态:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_s^A(k+1) &= \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_s(k+1) \\ \mathbf{X}_m(k+1) \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_s(k+1) \\ f(\hat{\mathbf{X}}_m(l), \mathbf{V}_m(l), \hat{w}_m(l)) \end{bmatrix} \\ \mathbf{P}_s^A(k+1) &= \Phi_s^A(k+1, k) \cdot \mathbf{P}_s^A(k) \cdot \Phi_s^{AT}(k+1, k) + \\ &\quad \Gamma_s^A(k) \cdot \mathbf{Q}_s^A(k) \cdot \Gamma_s^{AT}(k) \end{aligned} \quad (19)$$

### 3.4 Case 3: 主 UUV 广播通信包到达

$t_{k+1}$  时刻, 从 UUV 接收到主 UUV 于  $t_r$  时刻广播的通信包  $\{\hat{\mathbf{X}}_m(r), \mathbf{P}_m(r), \mathbf{u}_m(r)\}$ , 则利用主 UUV 的自身滤波信息对其预测的主 UUV 航迹进行修正.

#### 1) 时间更新过程

参考 3.2 节.

2) 基于延迟通信包的主 UUV 航迹预测, 记为  $\hat{\mathbf{X}}_m^c(k+1)$ , 则

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_m^c(k+1) &= f(\hat{\mathbf{X}}_m(r), \mathbf{u}_m(r)) \\ \mathbf{P}_m^c(k+1) &= \Phi_m^c(k+1, r) \cdot \mathbf{P}_m(r) \cdot \Phi_m^{cT}(k+1, r) + \\ &\quad \Gamma_m^c(r) \cdot \mathbf{Q}_m^c(r) \cdot \Gamma_m^{cT}(r) \end{aligned} \quad (20)$$

此时的更新周期为  $\Delta t' = (k+1-r) \times \Delta t$ .

#### 3) 主 UUV 航迹模型的修正

由式 (20) 可知, 基于延迟通信包的主 UUV 估计状态  $\hat{\mathbf{X}}_m^c(k+1)$  和方差  $\mathbf{P}_m^c(k+1)$  与从 UUV 滤波器中的主 UUV 预测模型不相关, 则可将  $\hat{\mathbf{X}}_m^c(k+1)$  视为观测信息, 进行滤波融合, 以修正  $\mathbf{X}_s^A(k+1, k)$ , 滤波过程与量测更新 (14) ~ (18) 类似, 此时, 量测

方程为  $\mathbf{H}^c = [\mathbf{O}_3, \mathbf{I}_3]$ , 新息及方差为

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_1(k+1) &= \hat{\mathbf{X}}_s^c(k+1, k) - \hat{\mathbf{X}}_m(k+1, k) \\ \mathbf{S}(k+1) &= \mathbf{P}_m(k+1, k) + \mathbf{P}_m^c(k+1) \end{aligned} \quad (21)$$

其中,  $\mathbf{O}_3$  为  $3 \times 3$  的零矩阵,  $\mathbf{I}_3$  为 3 阶单位矩阵.

### 4) 角速度估计器的更新

根据新的通信包数据  $w_m(r)$  对主 UUV 航迹预测模型中的角速度变量进行更新, 递推估计器见式 (10).

## 4 讨论 (Discussion)

### 4.1 滤波初始值的设定

在主 UUV 的第一次通信包到达之前, 从 UUV 定位系统无法建立主 UUV 的航迹预测模型, 因而无法使用已经到达的距离量测信息对定位结果进行修正. 则在第一次通信包到达时, 首先对从 UUV 的状态进行扩增, 其次预测主 UUV 的航迹, 最后基于已到达的量测信息完成量测更新过程 (14) ~ (18).

### 4.2 通信包和声脉冲信号同时到达

当对应于不同时刻的通信包和声脉冲信号同时到达时, 可采取序贯处理方式, 先根据 3.4 节对主 UUV 航迹进行修正, 再根据 3.3 节进行量测更新.

### 4.3 非匀速航行主 UUV 的航迹预测

3.1 节研究主 UUV 航迹预测算法时曾假设主 UUV 做匀速航行, 这在大多数情况下是可行的. 若假设不成立, 即当主 UUV 做非匀速航行时, 可将主 UUV 的速度扩增为状态变量, 由于 UUV 不做机动航行, 故将其加速度视为未知统计噪声, 进行噪声统计估计, 进而代入状态方程进行滤波更新, 噪声估计算法与角速度统计估计类似, 这里不再列出.

### 4.4 计算复杂度

本文采用状态扩增方法综合考虑了主、从状态之间的相关性, 提高了状态估计的准确度, 但同时增加了算法的计算复杂度. 若不考虑主、从状态之间的耦合性, 可采用仅包含从 UUV 状态的子滤波器进行量测更新, 不进行状态扩增, 减少了计算复杂度, 但由于忽略了主、从状态间的耦合性, 同时也降低了定位精度.

### 4.5 出序通信包的处理

由于水声通信时延较长, 可能出现如图 1(b) 所示的出序通信包, 即  $t_l$  时刻的通信包到达时,  $t_{l+N}$  时刻的通信包已先一步到达. 此时, 由于已利用  $t_{l+N}$  时刻的通信包对定位结果进行修正, 且  $t_{l+N}$  时刻的通信包已经包含  $t_l$  时刻的主 UUV 状态信息, 若仍然采用式 (21) 对主 UUV 航迹预测进行修正, 则会由于信息的重用带来主 UUV 状态估计的不一致. 因

表1  $t=1000\text{ s}$  时的主 UUV 航迹预测误差  
Tab.1 Path prediction errors of master UUV when the run time is 1000 s

	直线航行	曲线航行
主 UUV 位置预测误差 $[x, y, d]$ /m	$[-130.40, -130.53, 184.50]$	$[-15.90, -32.91, 36.55]$
主 UUV 自定位误差 $[x, y, d]$ /m	$[-131.78, -125.77, 182.66]$	$[-39.00, -50.05, 63.45]$

此,若出现出序通信包,则仅利用通信包中的角速度信息对角速度统计估计器进行更新,而不对主 UUV 航迹进行修正.

## 5 仿真研究 (Simulation research)

为验证算法的有效性,进行如下仿真研究.在下列仿真实验中,采用一主一从两个 UUV 组成的“主从式”协作,考虑到实际 UUV 的航行特征,试验设置如下:

- 1) 主、从 UUV 皆做速度为  $6\text{ kn}$  的定深航行;
- 2) 主、从 UUV 自身 INS 状态更新周期皆为  $\Delta t = 1\text{ s}$ , 主 UUV 声脉冲发送周期  $T = 10\text{ s}$ ;
- 3) 声纳探测过程中非传播时延  $\tau_c$  服从  $N(2\text{ s}, 10^{-4}\text{ s}^2)$  分布,水声通信非传播时延  $\tau_\beta$  服从  $N(15\text{ s}, 1\text{ s})$  分布;

4) 主 UUV 携带有高精度导航设备,其速度和角速度传感器的测量噪声分别为  $\sigma_v^2 = (0.3\text{ kn})^2$ ,  $\sigma_w^2 = (0.5^\circ/\text{s})^2$ ; 从 UUV 携带有低精度导航设备,其速度和角速度传感器的测量噪声分别为  $\sigma_v^2 = (0.6\text{ kn})^2$ ,  $\sigma_w^2 = (2^\circ/\text{s})^2$ . 在上述试验设置下,考虑下述 4 种定位算法:

- 1) 基于自身传感器测量的从 UUV 自主导航定位.
- 2) 忽略通信延迟的 EKF<sup>[9,21]</sup> 协同定位算法.
- 3) 考虑通信延迟的 DEKF<sup>[13]</sup> 算法.
- 4) 本文提出的 IIRU 算法.

针对上述 4 种算法分别进行仿真,绘制仿真曲线,对误差结果进行分析比较,其中误差曲线是运行 50 次蒙特卡洛仿真得到的定位误差的统计平均值.

图 2 为从 UUV 自身传感器定位、协同 EKF 定位、协同 DEKF 定位与本文提出的 IIRU 定位算法对比下的定位曲线和定位误差,由此可明显看出在存在通信时延情况下, IIRU 算法在抑制时延影响,提高定位精度方面的优越性.由图 2(a)、(b) 可看出,从 UUV 在只利用自身传感器定位情况下,定位效果较差,误差较大.由图 (c)、(d) 可看出,采用了 EKF 协同定位方式后,从 UUV 的定位精度得到提高,但由于未考虑通信延迟的影响,仍存在较大的误差.由图 (e)、(f) 可看出,针对通信延迟问题采用基于状态

逆推的 DEKF 方法,消除了部分延迟影响,定位精度有所提高,同样为延迟算法,应用 IIRU 算法的定位结果明显优于 DEKF 定位,有效地抑制了导航定位误差的增长速率.图 3 为主 UUV 做直线和曲线运动下的定位结果,包括主 UUV 自身传感器定位曲线及从 UUV 对主 UUV 的预测定位曲线,由仿真结果可看出不管是直线运动还是曲线运动,文中所设计的主 UUV 预测模型都能较好地预测主 UUV 的运动轨迹.

为更清晰地描述 IIRU 算法的定位效果,表 1 给出了  $t = 1000\text{ s}$  时的主 UUV 预测模型的定位误差.表 2 给出了  $t = 1000\text{ s}$  时前述 4 种定位方法下从 UUV 的定位误差.其中  $d$  为位置误差.可以看出,基于航迹预测的 IIRU 算法由于主 UUV 预测模型的精确使得算法可在通信时延情况下有效提高从 UUV 的定位精度.

表 2  $t=1000\text{ s}$  时的从 UUV 定位误差  
Tab.2 Localization errors of slave UUV when the run time is 1000 s

	位置预测误差 $[x, y, d]$ /m
自定位	$[767.52, 617.02, 984, 78]$
EKF 定位	$[690.34, -20.21, 690.63]$
DEKF 定位	$[77.26, -33.87, 84.36]$
IIRU 定位	$[19.22, 15.09, 24.43]$

## 6 结论及进一步的工作 (Conclusion and future work)

多 UUV 精确导航与定位是多 UUV 协作系统的关键技术之一.考虑到其协同定位系统高度依赖的水声通信和水声探测存在不可忽略的时间延迟,本文提出无需状态逆推的非等间隔的实时更新定位算法.在主从协作模式下,从 UUV 基于主 UUV 轨迹的预测模型完成实时的量测更新,并基于非等间隔滤波原理针对不同传感器数据采取不同的处理算法.仿真实验验证了该算法的有效性,可有效抑制外部传感器存在时延情况下的误差增长.该算法为解决多 UUV 协同定位技术中存在的水声延迟问题提供了一个有效的解决方法,但仍有较多工作需要进一步的研究:

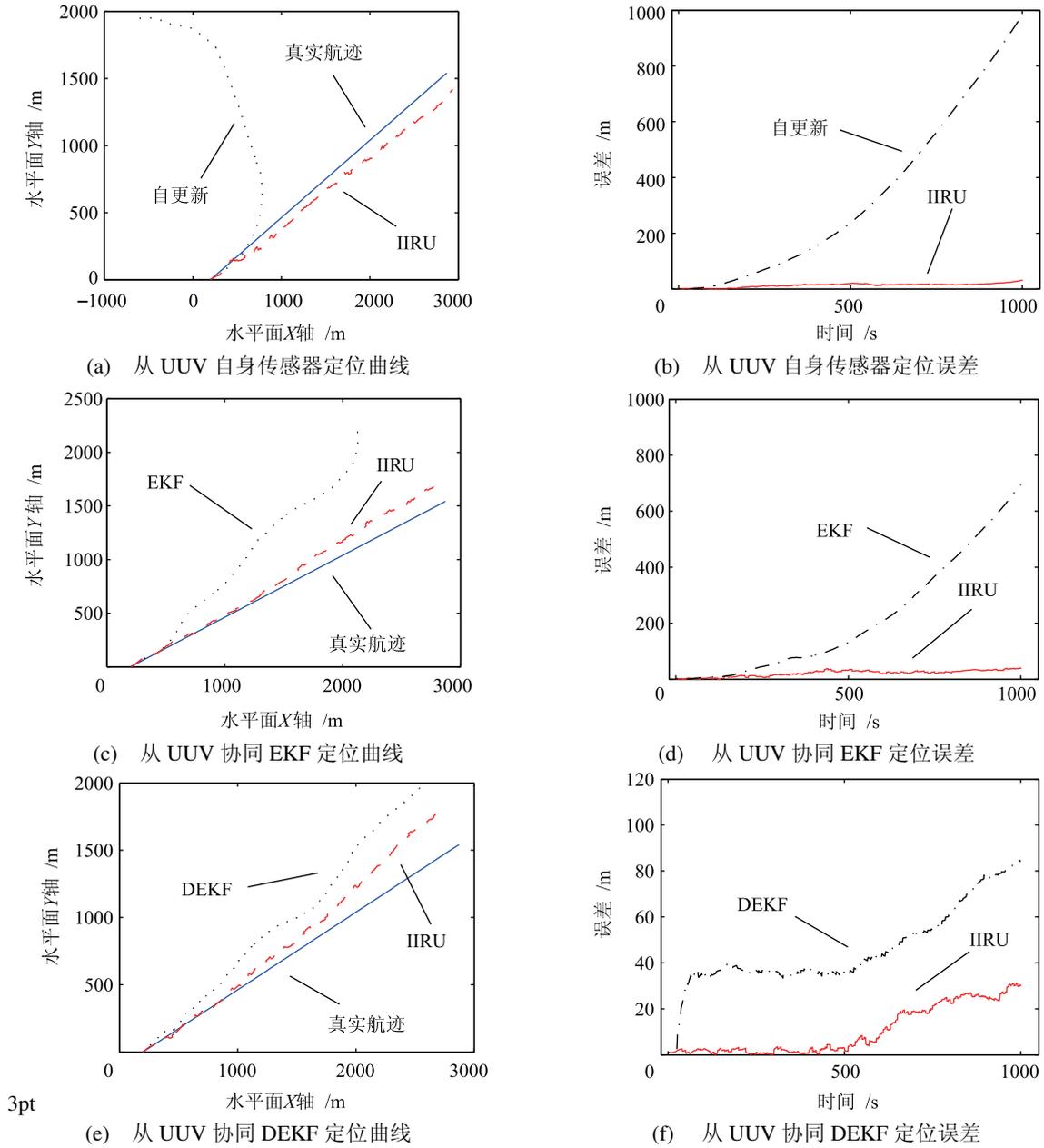


图 2 从 UUV 定位曲线和定位误差

Fig.2 Positions of slave UUV and errors of slave UUV localization

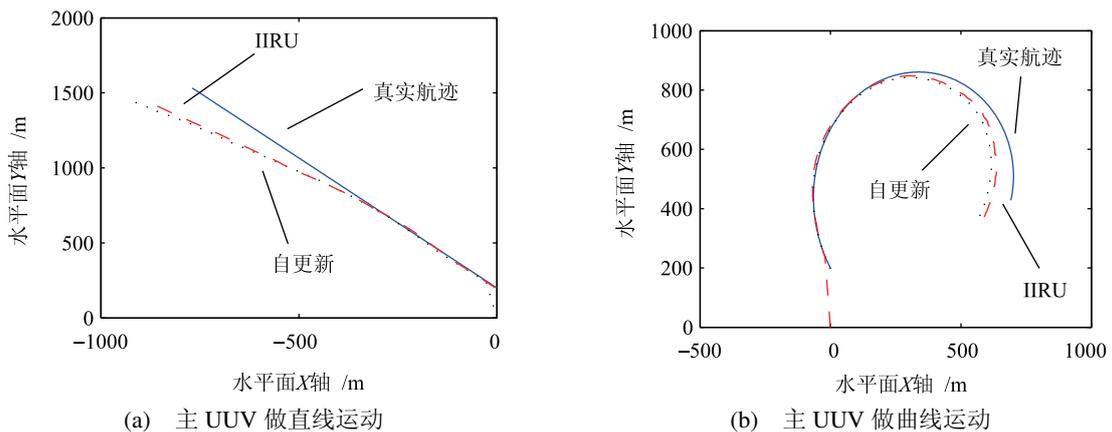


图 3 主 UUV 定位曲线

Fig.3 Positions of master UUV

1) 与不考虑延迟的 EKF 算法相比, IIRU 算法虽然极大地提高了通信延迟下的协同定位性能, 但同样也增加了算法的计算量. 由一系列仿真发现, 延迟时间越长, 本文所提出的 IIRU 延迟算法越优越, 从另一方面思考, 延迟时间越短, 则 IIRU 算法与 EKF 算法差异越小, 但 IIRU 算法的计算量并没有减小. 因此当时间延迟小于某个时间阈值时, 综合考虑计算量、存储量和定位性能, 可将时间延迟对系统的影响作为系统噪声进行处理而不采取任何延迟滤波进行处理, 关于延迟时间阈值的讨论将另文分析.

2) 本文仅研究了基于声纳测距的时延协同定位, 基于声纳测向以及同时测距测向的时延协同定位仍需进一步分析, 此外, 可能出现的通信包丢失、量测出序到达的情况也需作进一步研究.

3) 由仿真结果知, 算法精度与 UUV 间的相对运动及探测方式有关, 仍需从误差角度以及系统的能观性角度进行深入分析.

#### 参考文献 (References)

- [1] Vibeeshanan V J. A robust cooperative localization system for a heterogeneous team of small unmanned ground vehicles[D]. Arlington, TX, USA: The University of Texas at Arlington, 2007.
- [2] Roumeliotis S I, Bekey G A. Distributed multirobot localization[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2002, 18(5): 781-795.
- [3] Spletzer J R. Sensor fusion techniques for cooperative localization in robot teams[D]. Walnut Street, PA, USA: University of Pennsylvania, 2003.
- [4] Kanchanavally S. Cooperative navigation of autonomous vehicles in a known environment[D]. Dayton, OH, USA: University of Dayton, 2006.
- [5] Vaganay J, Leonard J J, Curcio J A, et al. Experimental validation of the moving long base-line navigation concept[C]//IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 59-65.
- [6] Willcox S, Goldberg D, Vaganay J, et al. Multi-vehicle cooperative navigation and autonomy with the bluefin CADRE system[C]//Proceedings of International Federation of Automatic Control Conference. Oxford, UK: Pergamon Press, 2006: 1-6.
- [7] Bahr A. Cooperative localization for autonomous underwater vehicles[D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [8] Eustice R M, Whitcomb L L, Singh H, et al. Experimental results in synchronous-clock one-way-travel-time acoustic navigation for autonomous underwater vehicles[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 4257-4264.
- [9] Eustice R M, Whitcomb L L, Singh H, et al. Recent advances in synchronous-clock one-way-travel-time acoustic navigation[C]//IEEE/MTS Oceans Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 1-6.
- [10] Karam N, Chausse F, Aufreire R, et al. Cooperative multi-vehicle localization[C]//IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 564-570.
- [11] Bahr A, Walter M R, Leonard J J. Consistent cooperative localization[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 3415-3422.
- [12] Maczka D K, Gadre A S, Stilwell D J. Implementation of a cooperative navigation algorithm on a platoon of autonomous underwater vehicles[C]//Oceans 2007. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1922-1927.
- [13] Yao Y, Xu D, Yan W. Cooperative localization with communication delays for MAUVs[C]//IEEE International Conference on Intelligent Computing and Intelligent Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 244-249.
- [14] Larsen T, Andersen N, Ravn O, et al. Incorporation of time delayed measurements in a discrete-time Kalman filter[C]//37th IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998: 3972-3977.
- [15] Tasoulis D K, Adams N M, Hand D J. Delayed measurements and the Kalman filter[EB/OL]. [2009-09-10]. [http://qfrmc. imaa.ic.ac.uk/aladdin\\_papers/tasoulisAH2007.pdf](http://qfrmc. imaa.ic.ac.uk/aladdin_papers/tasoulisAH2007.pdf).
- [16] Lu X, Zhang H, Wang W, et al. Kalman filtering for multiple time-delay systems[J]. Automatica, 2005, 41(6): 1455-1461.
- [17] Lu X, Xie L, Zhang H, et al. Robust Kalman filtering for discrete-time systems with measurement delay[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2007, 54(6): 522-526.
- [18] Huang G P, Roumeliotis S I. On the consistency of multi-robot cooperative localization[R]. Minneapolis, MN, USA: MARS Lab, University of Minnesota, 2009.
- [19] Sage A P, Husa G W. Adaptive filtering with unknown prior statistics[C]//Proceedings of Joint Automatic Control Conference. 1969: 760-769.
- [20] 茆诗松, 王静龙, 濮晓龙. 高等数理统计 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.  
Mao S S, Wang J L, Pu X L. Advanced mathematical statistics[M]. 2th ed. Beijing: Advanced Education Press, 2006.
- [21] 张立川, 徐德民, 刘明雍, 等. 基于移动长基线的多 AUV 协同导航 [J]. 机器人, 2009, 31(6): 581-585.  
Zhang L C, Xu D M, Liu M Y, et al. Research on cooperative navigation of multiple AUVs using moving long baseline[J]. Robot, 2009, 31(6): 581-585.

#### 作者简介:

- 姚尧 (1984-), 女, 博士生. 研究领域: 多 UUV 导航, 精确制导, 仿真.
- 徐德民 (1937-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 水下航行器总体设计, 自动控制技术.
- 张立川 (1982-), 男, 博士. 研究领域: 水下协同导航, 水下机器人控制, 水下机器人编队.