

# SINS/LBL 组合导航序贯滤波方法\*

高胜峰, 陈建华, 朱海  
(海军潜艇学院 青岛 266199)

**摘要:**在长基线水声定位系统(LBL)实际应用过程中,由于信标作用距离限制、障碍物遮挡等多种原因,使得水下无人航行器(UUV)可能无法接收到所有信标的应答信号而产生量测更新延迟问题。对UUV在无法接收到所有信标信号时的导航滤波算法进行了研究;结合捷联惯性导航系统(SINS)误差模型和声速误差,建立了SINS/LBL组合导航模型,并将异步量测序贯处理方法引入该模型,实现了SINS/LBL组合导航滤波算法的实时量测更新;通过湖上试验数据分析,对比了SINS/LBL组合导航序贯滤波方法与常规方法的位置误差。结果表明,该方法即使在应答信号有缺失的情况下,仍然能够利用有限的应答信号量测值进行实时量测更新,保障了组合导航的精度。

**关键词:** 组合导航;序贯滤波;水下无人航行器;捷联惯导;长基线

**中图分类号:** U666.1 TH89      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 580.50

## Sequential filter algorithm in SINS/LBL integrated navigation

Gao Shengfeng, Chen Jianhua, Zhu Hai  
(Navy Submarine Academy, Qingdao 266199, China)

**Abstract:** Due to the limited distance of beacon operating, stumbling block, etc. in long Base-Line (LBL) acoustic positioning system, the Unmanned Underwater Vehicle (UUV) may not receive the entire response signals, and cause the measurement update delay. The paper focuses the navigation filter algorithm for the above conditions. Combined the error model of Strapdown Inertial Navigation System (SINS) and the error of sound velocity, the SINS/LBL integrated navigation model is built. An asynchronous measurement sequential processing method is introduced into the SINS/LBL integrated navigation algorithm to optimize the filtering process and achieve measurement update in time. The positioning error between the sequential filter algorithm and the conventional algorithm in SINS/LBL integrated navigation is compared via lake trial data analysis. The results show that this method can perform measurement update timely using limited observed values of responding signal and guarantee the navigation precision, even when some responding signal is missing.

**Keywords:** integrated navigation; sequential filter; unmanned underwater vehicle(UUV); strapdown inertial navigation system(SINS); long base-line(LBL)

## 1 引言

水下无人航行器(unmanned underwater vehicle, UUV)以其体积小、工作范围广、隐蔽性好的优点,在海洋探测及保护等任务中,均扮演着重要的角色。在UUV执行任务时,为了确保其收集的数据的有效性,必须准确地知道UUV的位置、航向等导航信息。由此可见,精确的导航定位能力是UUV能够成功执行水下任务的基本要

素。目前UUV采用的水下导航定位系统主要是捷联惯性导航系统(strapdown inertial navigation system, SINS),但是惯导系统存在误差发散和随时间积累的问题,需要对其进行校正<sup>[1]</sup>。传统的方法是要求水下航行器浮出水面,接收GNSS信号实现校正,但是浮出水面的过程将极大影响水下航行器的隐蔽性和任务执行的连续性。而利用水声定位系统对惯导系统误差进行校正时,避免UUV浮起,极大地提高了UUV的隐蔽性和任务效能。

水声定位系统<sup>[2-6]</sup>主要有长基线(long base-line,

LBL)、短基线(short base-line, SBL)和超短基线(ultra short base-line, USBL)定位系统。其中,应用最广泛、发展最成熟的是LBL定位系统<sup>[7]</sup>。目前对于SINS/LBL组合导航系统的研究主要体现在组合方式上,文献[8]对INS/LBL松组合导航进行了建模仿真研究,主要针对LBL系统位置量测更新频率低的问题,提出采用INS数据对LBL数据进行内插修正的方法;文献[9]对INS/USBL松组合导航进行了研究,主要分析了利用USBL位置信息校正INS误差的可行性,并给出了相应的组合导航算法;文献[10]提出了一种基于LBL/DVL/INS紧组合系统,并使用到达时延的方法进行定位;文献[11]对INS/USBL紧组合导航进行了持续研究,涉及到模型建立、滤波方法、误差评估等各个方面,并进行了大量海上试验。

虽然SINS/LBL组合导航系统能达到较高的定位精度,但是在实际的组合导航应用中,由于信标作用距离限制、信标故障、障碍物遮挡等多种原因,可能无法接收到所有信标的应答信号,从而产生量测更新延迟。针对该问题,本文将异步量测序贯处理方法引入组合导航滤波算法中,使组合导航算法能及时进行量测更新,保证导航精度。

## 2 SINS/LBL组合导航模型

### 2.1 SINS误差模型

捷联惯导系统的非线性误差模型可以归纳为如下形式<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{\phi} = f^{-1}(\phi) [(I - C_n^n) \hat{w}_{in}^n + C_n^n \delta w_{in}^n - C_b^n \delta w_{ib}^b] \\ \delta \dot{v}^n = [I - (C_n^n)^T] C_b^n \dot{f}^b - (2\delta w_{ie}^n + \delta w_{en}^n) \times (\hat{v}^n - \delta v^n) + (C_n^n)^T C_b^n \delta f^b - (2\hat{w}_{ie}^n + \hat{w}_{en}^n) \times \delta v^n + \delta g^n \\ \delta \dot{L} = -\frac{\delta V_N}{R_M + H} \\ \delta \dot{\lambda} = \frac{\delta V_E}{R_N + H} \sec L - \frac{V_E \sec L}{R_N + H} \tan L \delta L \\ \delta \dot{H} = \delta V \end{cases} \quad (1)$$

式中:姿态误差矩阵  $C_n^n$ 、 $C_b^n$  表示理想导航坐标系( $n$ 系)、载体坐标系( $b$ 系)与实际SINS模拟数学平台坐标系( $n'$ 系)之间的关系;其中  $w_{in}^n$  为  $n$ 系相对于惯性系( $i$ 系)的转动角速度,  $\hat{w}_{in}^n$ 、 $\delta w_{in}^n$  分别为  $w_{in}^n$  的计算值和计算误差;  $w_{ib}^b$  为  $b$ 系相对于  $i$ 系的转动角速度,  $\delta w_{ib}^b$  为其计算误差;  $\dot{f}^b = \dot{f}^b + \delta \dot{f}^b$  为加速度计的测量值,  $\delta \dot{f}^b$  为加速度计测量误差;  $\delta g^n$  为重力补偿误差;  $w_{ie}^n$  为地球自转角速率;  $R_M$  和  $R_N$  分别为子午圈曲率半径和卯酉圈的曲率半径。

### 2.2 SINS/LBL组合导航模型

声速传播时延误差是由距离量测机制与水下航行器

运动状态决定的,而声速误差也是测距导航中不可避免的,二者是SINS/LBL组合导航中要考虑的基本误差因素<sup>[13-14]</sup>。在传统的水声测距定位中使用的声速修正方法中,虽然波阵面法<sup>[15]</sup>与本征声线法<sup>[16]</sup>等精度更高,但是其自身计算过程复杂,无法在组合导航算法中进行融合;而等效平均声速法虽然精度略差,但是模型简单,便于在实时性要求较高的组合导航算法中应用。下面以等效平均声速法为基础,建立声速误差估计模型。

设真实等效平均声速为  $C$ , 平均声速测量值为  $\tilde{C}$ ,  $\tilde{C}$  可以通过测量或其他方法估计得到的有效声速值,也可以是根据经验给出的初始声速值,则声速误差为:

$$\delta C = \tilde{C} - C \quad (2)$$

在一定时间一定区域内,可设  $\delta C$  为一随机常值,即有:

$$\delta \dot{C} = 0 \quad (3)$$

#### 1) 状态方程

在建立SINS/LBL组合导航模型时,将声速误差  $\delta C$  扩展为系统状态,在组合导航的滤波过程中进行实时估计。即选取系统状态变量如下<sup>[17-19]</sup>: 1) 捷联惯导系统误差  $X_{SINS}$ , 包括姿态误差  $\phi^n$ 、速度误差  $\delta v^n$ 、位置误差  $\delta P^n$ 、陀螺常值漂移  $\epsilon^b$  以及加表零偏  $\nabla^b$ ; 2) 声速误差  $\delta C$ 。系统状态变量共计16维。如下:

$$X = [(X_{SINS})^T \quad \delta C]^T \quad (4)$$

式中:  $\epsilon^b$ 、 $\nabla^b$ 、 $\delta C$  均视为随机常值。从而可得SINS/LBL组合导航系统状态方程如下:

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t) = \begin{bmatrix} F_{SINS} & \mathbf{0}_{15 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 15} & \mathbf{0}_{1 \times 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{SINS} \\ \delta C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{SINS} \\ \mathbf{0}_{1 \times 6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon^b \\ \nabla^b \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中:  $F_{SINS}$ 、 $G_{SINS}$  分别为SINS系统误差矩阵与过程噪声矩阵。

#### 2) 量测方程

以典型的4应答器配置为例,推导量测方程,以补偿水声传播时延误差。

在一个声信号发射周期内,设水下航行器从  $t_0$  时刻发出声信号到接收到应答信号所用时间为  $\Delta T_i$  ( $i = 1 \sim 4$ , 下同), 设  $t_0$  时刻水下航行器SINS输出位置值为  $P_{I,t_0} = [x_{I,t_0} \quad y_{I,t_0} \quad z_{I,t_0}]^T$ , 收到应答信号的  $t_0 + \Delta T_i$  时刻水下航行器SINS输出位置值为  $P_{I,t_0+\Delta T_i} = [x_{I,t_0+\Delta T_i} \quad y_{I,t_0+\Delta T_i} \quad z_{I,t_0+\Delta T_i}]^T$ , 并设最后一个应答信号到达的  $t_0 + \Delta T_4$  时刻SINS位置误差为  $\delta P_{I,t_0+\Delta T_4} = [\delta x \quad \delta y \quad \delta z]^T$ 。

根据应答式测距原理,当水下航行器处于运动状态时,水声信号来回传播距离不相等,有:

$$C \Delta T_i = R_i + R'_i = \|P_{t_0} - P_{bi}\| + \|P_{t_0+\Delta T_i} - P_{bi}\| \quad (6)$$

取传播时间为量测量,则量测方程如下:

$$\Delta T_i = (\|P_{I_{t_0}} - P_{bi}\| + \|P_{I_{t_0+\Delta T_i}} - P_{bi}\|) / C \quad (7)$$

另外,假设同一个声信号发射周期内(通常不超过10 s),SINS位置误差变化不大,即:

$$\delta P_{I_{t_0}} = \delta P_{I_{t_0+\Delta T_i}} = \delta P_{I_{t_0+\Delta T_i}} \quad (8)$$

则:

$$P_{I_{t_0}} = P_{I_{t_0}} - \delta P_{I_{t_0}} = P_{I_{t_0}} - \delta P_{I_{t_0+\Delta T_i}} \quad (9)$$

将式(9)代入式(7),得:

$$\Delta T_i = \frac{(\|P_{I_{t_0}} - \delta P_{I_{t_0+\Delta T_i}} - P_{bi}\| + \|P_{I_{t_0+\Delta T_i}} - \delta P_{I_{t_0+\Delta T_i}} - P_{bi}\|)}{C} + w_{ki} \quad (10)$$

式(10)为本文采取的SINS/LBL组合导航量测方程,可以实现水声传播时延误差的补偿。结合状态方程式(5)与量测方程式(10),便可构成SINS/LBL组合导航系统Kalman滤波器。

### 3 SINS/LBL组合导航的序贯滤波方法

#### 3.1 量测更新延时间题

前述SINS/LBL组合导航算法,虽然能达到较高的精度,并可同时补偿水声传播时延误差、声速误差及信标位置误差,但是在实际的组合导航应用中却会遇到一定的问题。首先,在进入阵区阶段,由于信标作用距离限制,可能无法接收到所有信标的应答信号,如图1所示,当水下航行器进入区域B时,已经进入1号和4号信标的作用范围内,但在2号和3号信标作用范围之外,只能接收到2个应答信号。另一方面,在阵区内部,也可能由于信标故障、障碍物遮挡等多种原因,导致各个发射周期内( $t_i \sim t_i + T$ 时间段)能接收到的应答信号数量是不确定的。在实时组合导航情况下,当不能接收到所有4个应答信号时,常规方法将无法判定当前接收到的信号是不是该周期内能接收到的最后信号,也就无法决定是否进行量测更新,这样的结果便是只有在 $t_i + T$ 时刻才能确定进行量测更新,从而产生延迟。这是上述方法在实时组合导航应用中会存在的问题<sup>[20]</sup>。

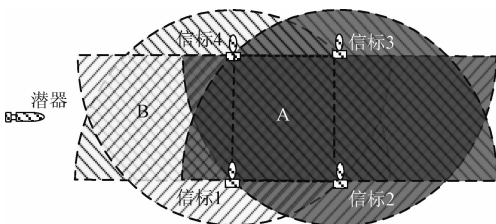


图1 信标作用范围示意图

Fig.1 The acting range of the beacon

为避免上述问题,本文提出一种SINS/LBL组合导航的序贯滤波方法,该方法按照异步量测的时间顺序即时更新系统状态,从而无须判断某个应答信号是不是该周期内能接收到的最后信号,对一个声信号发射周期内应答信号的数量也没有任何要求。为了区分,将前节所述的方法称为常规方法。

#### 3.2 序贯滤波方法

序贯滤波最早出现在多传感器信息融合中,尤其在目标跟踪与识别领域应用较多。序贯滤波的本质是通过估计协方差阵与系统状态等的合理传递,实现非同步传感器的逐级融合,其优势是结构可变,可适应传感器增减的情况,对噪声适用面也广。

序贯滤波系统的随机状态空间模型与Kalman滤波系统相同如下:

$$\begin{cases} X_k = \Phi_{k/k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} W_{k-1} \\ Z_k = H_k X_k + V_k \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $E[W_k] = 0$ ,  $E[W_k W_j^T] = Q_k \delta_{kj}$ ,  $E[V_k] = 0$ ,  $E[V_k V_j^T] = R_k \delta_{kj}$ ,  $E[W_k V_j^T] = 0$ 。

但是,这里假设在 $k$ 时刻量测方程可以分解成如下 $N$ 组:

$$\begin{bmatrix} Z_k^{(1)} \\ Z_k^{(2)} \\ \vdots \\ Z_k^{(N)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_k^{(1)} \\ H_k^{(2)} \\ \vdots \\ H_k^{(N)} \end{bmatrix} X_k + \begin{bmatrix} V_k^{(1)} \\ V_k^{(2)} \\ \vdots \\ V_k^{(N)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

且噪声 $V_k^{(i)}$ 与 $V_k^{(j)}$ ( $i \neq j$ )之间互不相关,这时量测噪声方差阵可写为分块对角阵形式,即:

$$R_k = \begin{bmatrix} R_k^{(1)} & & & \\ & R_k^{(2)} & & \\ & & \ddots & \\ & & & R_k^{(N)} \end{bmatrix} \quad (13)$$

序贯滤波方法的滤波过程如下:

1) 状态一步预测:

$$\hat{X}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (14)$$

2) 状态一步预测均方差:

$$P_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} P_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \quad (15)$$

3) 量测信息检测,如果量测信息有效,进行序贯滤波量测更新步骤4),否则:

$$\begin{cases} \hat{X}_k = \hat{X}_{k/k-1} \\ P_k = P_{k/k-1} \end{cases} \quad (16)$$

4) 序贯滤波量测更新,将量测更新分解为 $N$ 个子量测更新,其中:

$$\begin{cases} \hat{X}_k^{(0)} = \hat{X}_{k/k-1} \\ P_k^{(0)} = P_{k/k-1} \\ K_k^{(1)} = P_k^{(0)} (H_k^{(1)} P_k^{(0)} (H_k^{(1)})^T + R_k^{(1)})^{-1} \\ \hat{X}_k^{(1)} = \hat{X}_k^{(0)} + K_k^{(1)} (Z_k^{(1)} - H_k^{(1)} \hat{X}_k^{(0)}) \\ P_k^{(1)} = (I - K_k^{(1)} H_k^{(1)}) P_k^{(0)} \end{cases} \quad (17)$$

$$(18)$$

$$\begin{cases} \mathbf{K}_k^{(N)} = \mathbf{P}_k^{(N-1)} (\mathbf{H}_k^{(N)})^T [\mathbf{H}_k^{(N)} \mathbf{P}_k^{(N-1)} (\mathbf{H}_k^{(N)})^T + \mathbf{R}_k^{(N)}]^{-1} \\ \hat{\mathbf{X}}_k^{(N)} = \hat{\mathbf{X}}_k^{(N-1)} + \mathbf{K}_k^{(N)} (\mathbf{Z}_k^{(N)} - \mathbf{H}_k^{(N)} \hat{\mathbf{X}}_k^{(N-1)}) \\ \mathbf{P}_k^{(N)} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k^{(N)} \mathbf{H}_k^{(N)}) \mathbf{P}_k^{(N-1)} \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_k^N \\ \mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^N \end{cases} \quad (20)$$

与常规 Kalman 滤波过程相比,序贯滤波的主要不同之处在于量测更新,它将量测更新分解为  $N$  个子量测更新,  $k$  时刻的所有子量测更新等效于是在初值  $\hat{\mathbf{X}}_k^{(0)} = \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}$  和  $\mathbf{P}_k^{(0)} = \mathbf{P}_{k/k-1}$  条件下进行了  $N$  次递推最小二乘估计,最后结果作为 Kalman 滤波的估计输出。若视为递推最小二乘法,序贯滤波过程中的每个子量测更新公式可等价表示为:

$$(\mathbf{P}_k^{(i)})^{-1} = (\mathbf{P}_k^{(i-1)})^{-1} + (\mathbf{H}_k^{(i)})^T (\mathbf{R}_k^{(i)})^{-1} \mathbf{H}_k^{(i)} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} (\mathbf{P}_k^{(i)})^{-1} \hat{\mathbf{X}}_k^{(i)} &= (\mathbf{P}_k^{(i-1)})^{-1} \hat{\mathbf{X}}_k^{(i-1)} + \\ &(\mathbf{H}_k^{(i)})^T (\mathbf{R}_k^{(i)})^{-1} \mathbf{Z}_k^{(i)} \end{aligned} \quad (22)$$

理论上序贯滤波与常规滤波结果是等价的,下面证明在序贯滤波中当所有子量测更新完成之后,有  $\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_k^{(N)}$  和  $\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^{(N)}$  成立。

首先证明  $\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^{(N)}$ 。在常规滤波中有:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_k^{-1} &= \mathbf{P}_{k/k-1}^{-1} + \mathbf{H}_k^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{H}_k = \\ &\mathbf{P}_{k/k-1}^{-1} + [(\mathbf{H}_k^{(1)})^T \ \cdots \ (\mathbf{H}_k^{(N)})^T] \cdot \\ &\begin{bmatrix} \mathbf{R}_k^{(1)} & & \\ & \ddots & \\ & & \mathbf{R}_k^{(N)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{H}_k^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{H}_k^{(N)} \end{bmatrix} = \\ &\mathbf{P}_{k/k-1}^{-1} + (\mathbf{H}_k^{(1)})^T (\mathbf{R}_k^{(1)})^{-1} \mathbf{H}_k^{(1)} + \cdots + \\ &(\mathbf{H}_k^{(N)})^T (\mathbf{R}_k^{(N)})^{-1} \mathbf{H}_k^{(N)} \end{aligned} \quad (23)$$

而根据式(21),在序贯滤波中有:

$$\begin{aligned} (\mathbf{P}_k^{(N)})^{-1} &= (\mathbf{P}_k^{(N-1)})^{-1} + (\mathbf{H}_k^{(N)})^T (\mathbf{R}_k^{(N)})^{-1} \mathbf{H}_k^{(N)} = \\ &(\mathbf{P}_k^{(N-2)})^{-1} + (\mathbf{H}_k^{(N-1)})^T (\mathbf{R}_k^{(N-1)})^{-1} \mathbf{H}_k^{(N-1)} + (\mathbf{H}_k^{(N)})^T (\mathbf{R}_k^{(N)})^{-1} \mathbf{H}_k^{(N)} = \\ &\cdots = (\mathbf{P}_k^{(0)})^{-1} + (\mathbf{H}_k^{(1)})^T (\mathbf{R}_k^{(1)})^{-1} \mathbf{H}_k^{(1)} + \cdots + \\ &(\mathbf{H}_k^{(N)})^T (\mathbf{R}_k^{(N)})^{-1} \mathbf{H}_k^{(N)} \end{aligned} \quad (24)$$

比较式(23)和(24),考虑到  $\mathbf{P}_{k/k-1} = \mathbf{P}_k^{(0)}$ ,因此  $\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^{(N)}$  得证。

其次证明  $\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_k^{(N)}$ ,在常规滤波中有:

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_k^{-1} \hat{\mathbf{X}}_k &= \mathbf{P}_{k/k-1}^{-1} \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} + \mathbf{H}_k^T \mathbf{R}_k^{-1} \mathbf{Z}_k = \mathbf{P}_{k/k-1}^{-1} \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} + \\ &[(\mathbf{H}_k^{(1)})^T \ \cdots \ (\mathbf{H}_k^{(N)})^T] \begin{bmatrix} \mathbf{R}_k^{(1)} & & \\ & \ddots & \\ & & \mathbf{R}_k^{(N)} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_k^{(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{Z}_k^{(N)} \end{bmatrix} = \\ &\mathbf{P}_{k/k-1}^{-1} \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} + (\mathbf{H}_k^{(1)})^T (\mathbf{R}_k^{(1)})^{-1} \mathbf{Z}_k^{(1)} + \cdots + \\ &(\mathbf{H}_k^{(N)})^T (\mathbf{R}_k^{(N)})^{-1} \mathbf{Z}_k^{(N)} \end{aligned} \quad (25)$$

而根据式(22),在序贯滤波中有:

$$\begin{aligned} (\mathbf{P}_k^{(N)})^{-1} \hat{\mathbf{X}}_k^{(N)} &= (\mathbf{P}_k^{(N-1)})^{-1} \hat{\mathbf{X}}_k^{(N-1)} + \\ &(\mathbf{H}_k^{(N)})^T (\mathbf{R}_k^{(N)})^{-1} \mathbf{Z}_k^{(N)} = (\mathbf{P}_k^{(N-2)})^{-1} \hat{\mathbf{X}}_k^{(N-2)} + \\ &(\mathbf{H}_k^{(N-1)})^T (\mathbf{R}_k^{(N-1)})^{-1} \mathbf{Z}_k^{(N-1)} + (\mathbf{H}_k^{(N)})^T (\mathbf{R}_k^{(N)})^{-1} \mathbf{Z}_k^{(N)} = \cdots = \\ &(\mathbf{P}_k^{(0)})^{-1} \hat{\mathbf{X}}_k^{(0)} + (\mathbf{H}_k^{(1)})^T (\mathbf{R}_k^{(1)})^{-1} \mathbf{Z}_k^{(1)} + \cdots + (\mathbf{H}_k^{(N)})^T (\mathbf{R}_k^{(N)})^{-1} \mathbf{Z}_k^{(N)} \end{aligned} \quad (26)$$

比较式(25)和(26),考虑到  $\mathbf{P}_k = \mathbf{P}_k^{(N)}$ 、 $\mathbf{P}_{k/k-1} = \mathbf{P}_k^{(0)}$  和  $\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \hat{\mathbf{X}}_k^{(0)}$ ,因此  $\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_k^{(N)}$  得证。

通过上述分析,可以得到序贯方法可以在保证滤波精度的前提下,将高维数量测更新降低为多个低维数的量测更新。当某个或某部分低维数的量测更新无效时,序贯方法直接使用状态一步预测估计进行代替,从而避免了当无法得到所有量测信息时而产生的量测更新延迟问题。将该思想运用到 SINS/LBL 组合导航系统中,从而形成了 SINS/LBL 组合导航序贯滤波方法。

如图2所示,水下航行器在  $t_0$  时刻发送声信号,分别在  $t_1 \sim t_4$  时刻接收到应答信号。常规方法中,在  $t_4$  时刻进行量测更新,量测量为所有4个应答信号对应的传播时间。而序贯处理方法中,在一个发射周期  $t_0 \sim t_0 + T$  时间段内,每收到一个应答信号的  $t_0 + \Delta T_i$  时刻,即进行一次量测更新,量测量为第  $i$  个应答信号对应的传播时间。在序贯处理方法中,系统状态方程与常规方法完全相同,但量测方程维数为1。从而可得,SINS/LBL 组合导航序贯滤波方法的量测方程如下:

$$\begin{aligned} \Delta T_i &= \\ &\frac{(\|\mathbf{P}_{I,t_0} - \delta \mathbf{P}_{I,t_0+\Delta T_i} - \mathbf{P}_{bi}\| + \|\mathbf{P}_{I,t_0+\Delta T_i} - \delta \mathbf{P}_{I,t_0+\Delta T_i} - \mathbf{P}_{bi}\|)}{(\bar{C} - \delta C)} \end{aligned} \quad (27)$$

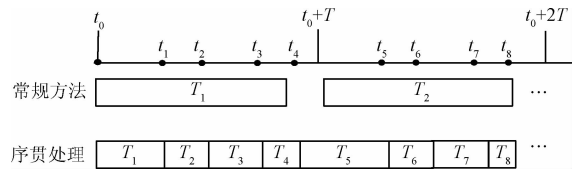


图2 序贯滤波方法

Fig. 2 Demonstration of sequential filter algorithm

各个信标应答信号也有可能几乎同时到达。在实际的滤波过程中,往往以 SINS 的更新周期作为系统状态更新的周期,如果两个应答信号到达的时间间隔小于 SINS 的更新周期,则认为是同时到达。事实上, Kalman 滤波的时间更新过程与量测更新过程是相对独立的,这为处理上述特殊情况提供了便利。当两个以上应答信号同时到达时,时间更新过程仍然保持不变,而将同时到达的两个量测量一起作为量测,进行量测更新。

## 4 试验验证

### 4.1 试验条件

为了验证 SINS/LBL 组合导航序贯滤波算法性能, 2015 年 4 月在浙江千岛湖实验区进行了惯导组合导航及声信标校正实验。

实验系统包括差分 GPS、捷联式光纤陀螺惯导、长基线声信标系统、上位计算机等。其中差分 GPS 作为位置基准, 用于实验结果比对和部分组合导航的信号源, 同时也作为时间基准。上位计算机进行惯导实时解算, 并存储原始数据用于离线分析处理。组合导航上位机、LBL 数据处理计算机等均位于试验船后部船舱, SINS 安装在事先设置好的上甲板中心位置, LBL 信号发射换能器固定于实验船前部的支架并探出到水下。试验船自身无动力, 由另一艘带动力船并排捆绑以提供动力。



(a) LBL 信号发射换能器  
(a) The energy converter of LBL



(b) LBL 声信标  
(b) LBL sound beacon



(c) 温盐深仪系统  
(c) CTD (conductivity, temperature, depth) system

图 3 湖试实验设备

Fig. 3 Instruments for lake experiments

各设备性能参数如表 1 所示。

表 1 设备性能参数

Table 1 Performance parameters of equipments

设备名称	精度等级	更新频率/Hz
陀螺漂移	陀螺漂移 $0.1^\circ/\text{h}$ (未标定)	400
加速度计	加表零偏 $50 \mu\text{g}$	200
差分 GPS	定位精度 $< 2 \text{ m}$	1

在事先选定的某区域布放四边形信标阵, 边长约为 1.5 km, 试验船绕行各信标一周进行信标位置校准。各信标位置校准结果如表 2 所示。

表 2 LBL 声信标布放位置校准结果

Table 2 The position of LBL sound beacons

信标编号	地理坐标位置(经纬度)	阵区坐标位置(东北天)
11#	E 118°58.01028' N 29°35.46918'	0.0, 0.0
12#	E 118°58.36183' N 29°34.79348'	566.237061, -1251.5979
13#	E 118°59.09538' N 29°35.21286'	1752.552490, -473.446625
14#	E 118°58.61742' N 29°36.02928'	979.257874, 1034.738525

船上 LBL 基阵发射声信号的周期为 4 s, 对于所布放的信标阵范围大小来说, 可以保证 4 个信标的应答信号都能在一个发射间隔内到达。各信标的应答信号可通过频率区分。试验中使用的声速测量仪器为 Sea-Bird Electronics 公司的温盐深仪, 如图 4 所示。将测量仪下沉到湖底, 然后均匀缓慢拉起, 收集各深度测量参数, 并根据经验公式计算平均声速值。测点湖底深度约为 50 m,

测量的平均声速值为 1 461 m/s, 该值可作为组合算法中声速估计的参考值, 当然该值也可能有误差。

### 4.2 试验数据分析

千岛湖区湖底地形复杂, 水声信号的传播易受影响和阻挡, 所以各信标应答信号缺失现象比较严重, 如图 4 所示。图 4 中, 当应答信号缺失时, 其时延值赋为负值。对所有 4 个应答器的应答信号缺失情况进行统计, 如表 3 所示。

**表3 应答信号缺失统计**  
**Table 3 Statistics of responding signal missing**

总应答次数	955	占比/%
无缺失	415	43.46
缺失 1 个	411	43.04
缺失 2 个及以上	129	13.50

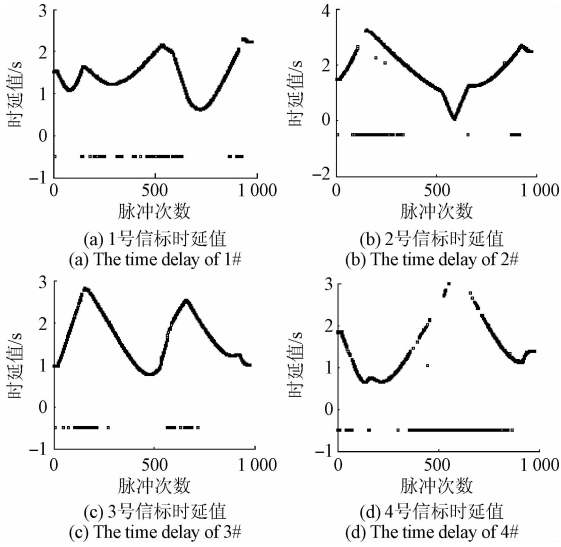


图4 各信标应答信号时延值

Fig. 4 The time delay of each responding signal for each beacon

由表3可以看出,一次应答中至少一个应答信号缺失的情况占比超过一半。使用常规 SINS/LBL 组合导航流程将会存在诸多不便,所以使用 SINS/LBL 组合导航的序贯滤波方法,并与常规 SINS/LBL 组合导航进行对比分析。湖上试验信标阵位置与试验航迹如图5所示,两种方法(SINS/LBL 组合导航常规方法和序贯方法)的位置误差如图6和表4所示。

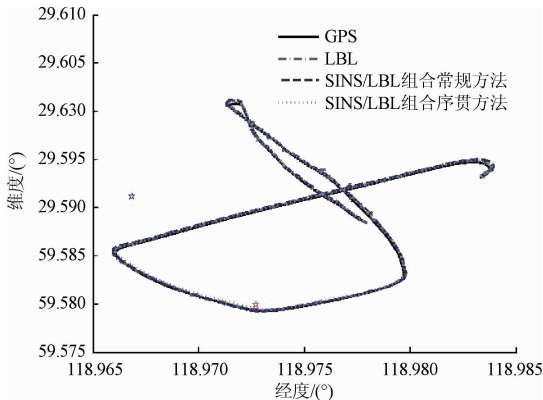
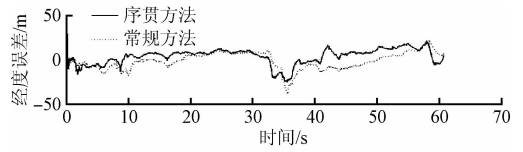
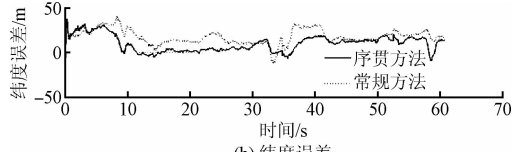


图5 信标阵及试验航迹

Fig. 5 The beacon location and the trial track



(a) 经度误差 (a) The longitude error



(b) 纬度误差 (b) The latitude error

图6 两种方法位置误差比较

Fig. 6 The location errors of the two methods

表4 两种方法位置误差比较

**Table 4 The location error comparison of the two methods**  
 (m)

		最大误差	均方根误差
经度	序贯方法	29.002	61.110
	常规方法	38.994	78.575
纬度	序贯方法	37.733	105.245
	常规方法	41.128	177.413

由图5、6和表4可以看到,相比常规方法,序贯方法处理后的经度最大误差从38.994 m减小到29.002 m,均方根误差从78.575 m减小到61.110 m,经度误差的最大误差降低率为25.62%,均方根误差降低率为22.22%;纬度的最大误差从41.128 m减小到37.733 m,均方根误差从177.413 m减小到105.245 m,纬度误差的最大误差降低率为8.25%,均方根误差降低率为40.68%;SINS/LBL 组合导航序贯方法位置误差明显优于常规方法。即与常规 SINS/LBL 组合导航相比,SINS/LBL 组合导航序贯方法位置误差总体较小,且波动更小。主要因为由于某些时段应答信号缺失严重,LBL 定位精度较低,甚至无法计算定位结果,从而只能 SINS 独自工作,导致位置误差增大,而采用 SINS/LBL 组合导航序贯方法,即使应答信号有缺失,仍然能够利用有限的应答信号量测值进行实时量测更新,保持组合导航精度。

### 5 结论

SINS/LBL 组合导航系统较高的定位精度,为 UUV 隐蔽执行海洋探测及保护等任务提供了重要保证。但是在实际应用中,SINS/LBL 组合导航由于信标作用距离限制、信标故障、障碍物遮挡等多种原因,可能无法接收到所有信标的应答信号,从而产生量测更新延迟。针对该

问题,本文将异步量测序贯处理方法引入组合导航滤波算法中,使组合导航算法能及时进行量测更新。通过湖试验证了该方法即使在应答信号有缺失的情况下,仍然能够利用有限的应答信号量测值进行实时量测更新,保持组合导航精度。

## 参考文献

- [1] 王宏健,李村,么洪飞,等.基于高斯混合容积卡尔曼滤波的UUV自主导航定位算法[J].仪器仪表学报,2015,36(2):255-261.  
WANG H J, LI C, ME H F, et al. Gaussian mixture cubature Kalman filter based autonomous navigation and localization algorithm for UUV[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(2): 255-261.
- [2] SARAH E W, JEFFREY M W, LOUIS L W, et al. Decentralized extended information filter for single-beacon cooperative acoustic navigation: Theory and experiments[J]. IEEE Transaction on Robotics, 2013, 29(4): 957-974.
- [3] 任海鹏,白超,刁亚平.一种混沌水声定位方法[J].仪器仪表学报,2015,36(6):1227-1235.  
REN H P, BAI CH, XI Y P. An underwater chaotic acoustic positioning method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(6): 1227-1235.
- [4] 鲍骏,郭爱煌.波束成形在水声定位中的应用[J].电子测量技术,2014,37(11):42-45.  
BAO J, GUO AI H. The application of beamforming in acoustic positioning[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(11): 42-45.
- [5] 李楠松,朴胜春.单矢量水听器被动测距方法研究[J].仪器仪表学报,2015,36(10):2273-2282.  
LI N S, PIAO SH CH. Research on passive ranging method with single vector hydrophone[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(10): 2273-2282.
- [6] 刘绍锦,王志乾,王春霞,等.舰船间水平间距及舷偏角测量[J].电子测量与仪器学报,2015,29(4):483-488.  
LIU SH J, WANG ZH Q, WANG CH X, et al. Measurement of horizontal distance and declination angle between boats[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(4): 483-488.
- [7] JI D X, LIU J. Ray theory application in long baseline system[J]. China Ocean Engineering, 2010, 24(1): 199-206.
- [8] 张源,卞鸿巍.基于内差修正数据INS/APS卡尔曼滤波器组合定位[J].火力与指挥控制,2009,34(9):69-71.  
ZHANG Y, BIAN H W. Research on INS/APS Kalman filter based on APS interpolation data correction algorithm for submarine[J]. Fire Control & Command Control, 2009, 34(9): 69-71.
- [9] 汪湛清,房建成.惯性导航系统水下校准新方法[J].中国惯性技术学报,2011,19(4):467-472.  
WANG ZH Q, FANG J CH. New method of correction for underwater inertial navigation system[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(4): 467-472.
- [10] MILLER P A, FARRELL J A, YUAN Y Z, et al. Autonomous underwater vehicle navigation[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, 35(3): 663-678.
- [11] MORGADO M, OLIVEIRA P, SILVESTRE C. Tightly coupled ultra-short baseline and inertial navigation system for underwater vehicles: An experimental validation[J]. Journal of Field Robotics, 2013, 30(1): 142-170.
- [12] 孙枫,唐李军.基于CKF的SINS大方位失准角初始对准[J].仪器仪表学报,2012,33(2):327-333.  
SUN F, TANG L J. Initial alignment of large azimuth misalignment angle in SINS based on CKF[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(2): 327-333.
- [13] 冀大雄,刘健,周波,等.深水机器人低成本导航系统的位置估计方法研究[J].仪器仪表学报,2009,30(1):35-38.  
JI D X, LIU J, ZHOU B, et al. Position estimation method for deep water vehicle using low-cost navigation sensors[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(1): 35-38.
- [14] 马超,乔纯捷,王跃科.水下监测系统中水平指向性噪声实时测量方法[J].电子测量与仪器学报,2014,28(6):610-616.  
MA CH, QIAO CH J, WANG Y K. Real-time measuring method for horizontal beam-noise spectrum levels in underwater monitoring system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014, 28(6): 610-616.
- [15] HUNKLINGER S, ARNOLD W. Ultrasonic properties of glasses at low temperatures[J]. Physical Acoustics, 1976, 12(1): 155-215.
- [16] 张宝华,赵梅.海水声速测量方法及其应用[J].声学技术,2013,32(1):24-28.  
ZHANG B H, ZHAO M. Sound speed measurement in seawater and its application[J]. Technical Acoustics, 2013, 32(1): 24-28.
- [17] 钟丽娜,刘建业,李荣冰,等.INS/SFGPS-PPP紧组合系统动态补偿滤波算法[J].仪器仪表学报,2016,37(6):1283-1289.  
ZHONG L N, LIU J Y, LI R B, et al. Dynamic compensation filter algorithm for INS/SFGPS-PPP tightly coupled system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1283-1289.
- [18] ZHAO H D, LI ZH P, ZHANG H S. Ultra-tight GPS/INS integration based long-range rocket projectile navigation method[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2015, 6(2): 153-160.

- [19] 张涛,石宏飞,陈立平,等. 基于 UKF 的 SINS/LBL 水下 AUV 紧组合定位技术[J]. 中国惯性技术学报, 2016,24(5): 638-642.  
ZHANG T, SHI H F, CHEN L P, et al. An underwater positioning technology based on tightly coupled SINS/LBL for AUV [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2016, 24(5): 638-642.
- [20] 连远锋,李国和,吴发林,等. 基于遗传 PNN 网络的组合导航故障诊断研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(1):120-126.  
LIAN Y F, LI G H, WU F L, et al. Fault-diagnosis method for INS/GPS integrated navigation system based on PNN and genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(1): 120-126.

### 作者简介



**高胜峰**(通讯作者),2010 年于燕山大学获得学士学位,2012 年于海军潜艇学院获得硕士学位,现为海军潜艇学院在读博士研究生,主要研究方向为潜艇航行环境分析与保护。

E-mail: gaoshengfeng205@126.com

**Gao Shengfeng** (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2010 from Yanshan University, and received his M. Sc. degree from Navy Submarine Academy in 2012. Now he is a Ph. D. candidate in Navy Submarine Academy. His main research interest is analysis and protection of submarine navigation environment.



**朱海**,1987 年于上海理工大学获得学士学位,分别在 1995 年和 1998 年于中国海洋大学获得硕士学位和博士学位,现为海军潜艇学院教授,主要研究方向为潜艇水下导航技术、潜艇航行环境分析与保护。

E-mail: seapeter@163.com

**Zhu Hai** received his B. Sc. degree in 1987 from University of Shanghai for Science and Technology, and received his M. Sc. and Ph. D. degrees both from Ocean University of China in 1995 and 1998, respectively. Now he is a professor in Navy Submarine Academy. His main research interests include submarine navigation, analysis and protection of submarine navigation environment.