

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905587

基于虚拟移动长基线的载人潜水器声学定位算法*

尤晓艳^{1,2,3}, 武岩波^{1,3,4}, 朱敏^{1,3,4}

(1. 中国科学院声学研究所海洋声学技术中心 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100190;
3. 北京市海洋声学装备工程技术研究中心 北京 100190; 4. 中国科学院声学研究所
声场声信息国家重点实验室 北京 100190)

摘要:为保障潜水器水下安全作业,设计了一种基于虚拟移动长基线(VMLBL)的声学定位算法,并对影响定位误差的因素进行了分析。该算法无需事先布放海底基阵,仅利用存储的距离信息实现潜水器定位。首先基于卡尔曼滤波算法的新息特性对测距信息进行野值剔除及信息修正,克服异常值对定位结果的影响;然后融合潜水器移动矢径和测距信息构建虚拟移动长基线定位系统,用最小二乘法对其进行解算;最后级联卡尔曼滤波进行信号处理并给出最终定位结果。仿真和试验结果表明,算法定位误差在10%以内的数据有效率可以达到95.1%,定位结果能较好拟合超短基线定位系统,可以为载人潜水器提供有效的辅助定位。

关键词:虚拟移动长基线;野值剔除;最小二乘;卡尔曼滤波;载人潜水器

中图分类号: TB568 TH766 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Acoustic localization algorithm of human occupied vehicle based on virtual moving long baseline

You Xiaoyan^{1,2,3}, Wu Yanbo^{1,3,4}, Zhu Min^{1,3,4}

(1. Ocean Acoustic Technology Center, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Beijing Engineering Technology
Research Center of Ocean Acoustic Equipment, Beijing 100190, China; 4. State Key Laboratory of
Acoustics, Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: To ensure the safety of the human occupied vehicle (HOV), an acoustic localization algorithm is proposed based on the virtual moving long baseline (VMLBL) technique. The influence factors on positioning error are analyzed. Instead of deploying transponders on the seafloor in advance, a set of manoeuvres are conducted to localize the HOV. First, based on the property of the innovation, an improved Kalman filter algorithm is used to perform outlier rejection and information correction for the range information. In this way, the influence of outlier can be overcome. Secondly, the VMLBL is constructed by fusing the moving radius vector of the HOV and the range information between the HOV and the ship. Then, the initial position results are calculated by the least squares method. To obtain more accurate position results, a cascade Kalman filter is utilized for trajectory smoothing and the final positioning result can be achieved. Simulations and sea trial data processing results show that the effective rate of data can reach 95.1% with positioning error less than 10%. The final positioning results are consistent with those of the ultra-short baseline positioning system. Thus, the proposed algorithm can provide an effective auxiliary way to localize the HOV.

Keywords: virtual moving long baseline; outliers rejection; least squares; Kalman filter; human occupied vehicle

收稿日期:2019-09-06 Received Date:2019-09-06

* 基金项目:国家自然科学基金(61971472)、国家重点研发计划(2016YFC0300300,2016YFC0300605)、中国科学院海洋信息技术创新研究院创新前瞻项目(CXQZ201705,CXQZ201801)、中国科学院声学研究所青年英才计划(QNYC201609)项目资助

0 引言

水声定位技术被广泛应用于海洋油气开采作业、海底矿产资源开采、深海空间站、海洋科学考察和海底残骸打捞等许多领域^[1]。其中在水下航行器作业领域,载人潜水器可运载科学家到达深海的海山、盆地等复杂海底地形进行巡航、悬停、正确就位和定点坐坡作业^[2],为保障其安全,对载人潜水器的定位有更高要求。我国首台载人潜水器“蛟龙”号,其高速水声通信技术、高分辨率测深侧扫声纳技术及高性能避碰声纳技术等声学系统处于国际领先水平,实现了世界上首次 7 000 m 深度的潜水器与母船间的图像、语音、数据和文字的水声通信传输^[3]。但其导航定位功能主要依靠法国 IXLBLUE 公司的 RAMSES 6000 长基线和 POSIDONIA II 超短基线两套声学定位系统实现^[4-5],为实现国产化,进行了水声定位系统的研制。在中国第二台深海载人潜水器“深海勇士”号采用国产高精度超短基线系统,深海定位精度达到 0.3 m,定位有效率超过 90%^[6]。目前在研的万米级载人潜水器,其声学定位系统将为其进行万米深渊“马里亚纳海沟”的科学探索提供高精度实时导航定位服务,保障潜水器安全作业。

除超短基线定位系统,水声定位系统还包括长基线定位系统和短基线定位系统。其中长基线系统定位精度最高^[7],但其实现需要在水底布放 3 个及以上信标,布放、标定、回收困难,且有效作用范围仅为信标阵内的区域,在实际应用中受到诸多限制。

2000 年 Larsen 等^[8]提出了虚拟长基线(synthetic long baseline, SLBL)的概念,以实现单信标定位^[9],解决了传统长基线基元数目多,操作复杂、耗费大等问题,并利用自行设计的 SLBL 和航位推算系统进行了试验。基于固定单信标的虚拟长基线定位技术,2006 年 Lapointe^[10]提出虚拟移动长基线定位技术,信标可随被定位目标移动,提供更灵活区域的潜水器定位。Tan 等^[11]研究了基于距离信息的单信标定位路径规划问题。曹俊等^[12]研究了 AUV 直线航迹下的单信标测距定位,并研究了虚拟阵列误差源对定位精度的影响。朱子尧等^[13]提出一种基于移动矢径(moving radius vector, MRV)的单信标同步式测距定位算法,建立了移动单信标测距定位模型,利用扩展卡尔曼滤波算法实现了定位滤波算法的设计,缺点是定位过程需要进行一次变向机动。

虚拟移动长基线定位依赖于潜水器和信标之间的距离信息,通过水下声信号传播时延^[14]计算距离信息时,由于水声信道多途效应^[15]和噪声等因素影响,测距信息存在许多孤立或成片的野值。这些野值和正常量测值相

差很大,容易造成系统不稳定乃至崩溃,进而导致跟踪系统的跟踪精度降低,甚至因此失去跟踪目标。野值剔除技术被广泛应用于卫星导航系统^[16-17]、机电系统^[18]、无线传感器网络^[19]、铁路轨道^[20]、计算机视觉^[21]等领域。Xiao 等^[22]提出了一种基于改进平方根无迹卡尔曼滤波(square root unscented Kalman filter, SRUFK)野值剔除算法。Nigam 等^[23]提出了一种全局高维野值检测算法(global high dimension outlier detection algorithm, GHOA),先把数据分集再分别进行野值剔除。Qiao 等^[24]根据 Kalman 滤波新息序列的正交性对观测野值进行判断剔除,将含有野值的测量值忽略不用,使其对状态估计不产生作用,以此来剔除野值的干扰。Cao 等^[25]提出一种低阶多项式拟合方法来检测和剔除野点。张勋等^[26]利用基于最小二乘多项式拟合的剔除野值法实现对异常值的剔除,并进行补值,保持数据的连续性。常见的去野值方法有卡尔曼滤波方法、最小均方自适应滤波、递推最小二乘自适应滤波等。其中最小均方自适应滤波算法的收敛速度会受迭代步长的影响,而且因瞬时梯度估计围绕精确值波动,权系数估计值会较大^[27]。递推最小二乘自适应滤波算法缺乏对观测值当中的野值的抗干扰性,导致状态向量的滤波值的精度和可靠性较差^[28]。卡尔曼滤波是一种成熟的滤波技术,广泛应用于各领域。但是当野值出现时,会破坏新息特性,导致滤波不准。

本文的主要贡献是设计了一种基于虚拟移动长基线的载人潜水器声学定位算法,在定位解算之前进行测距信息的预处理,结合实际海试数据特点,基于新息正交特性利用卡尔曼滤波判别野值,并采用线性差值的方法进行野值剔除及数据修正,可以有效应对离散野值和连续野值的影响,提高数据有效性及数据利用率,定位解算之后进行滤波,平滑跳跃的解算结果。并将其应用于载人潜水器近海底航行时的定位,融合潜水器的移动矢径信息、母船 GPS 信息及测距信息,通过构建虚拟移动长基线定位系统来实现潜水器位置的确定,保证潜水器安全,仿真对比说明定位解算前后进行野值剔除的必要性。

一方面,相较于纯方位目标定位^[29],本文所提方法仅需要潜水器与信标之间的距离信息,避免了潜水器与信标之间的方位测量(由于水下环境的复杂性,依靠水声手段来测量方位难度很大),极大提高了测量数据的可靠性,且测量原理简单,易于施行;另一方面,该方法能够有效降低潜水器导航系统的硬件复杂度,无需事先布放海底基阵等辅助设备,降低定位成本,广泛适用于潜水器执行各种任务的需求。

1 定位过程

首先基于声传播时延计算距离信息,并对距离信息

进行预处理,利用卡尔曼滤波中新息特性对得到的距离信息中的野点进行剔除和修正。得到足够的距离信息后,构建虚拟移动长基线定位系统并利用最小二乘法进行定位解算,最后进行卡尔曼滤波处理得到最终位置估计结果。利用虚拟移动长基线定位不用在海底铺设定位基阵,省去了复杂的布放、校准和回收过程,且只有一个移动信标,可以进一步降低成本,定位不局限于固定区域,定位过程更灵活。

1.1 测距信息预处理

首先选择并记录有用的距离信息。假设过程噪声和量测噪声都是零均值高斯白噪声,信号和噪声不相关,利用卡尔曼滤波中新息特性进行野值剔除和修正。设卡尔曼滤波系统状态方程为:

$$\mathbf{X}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{w}(k) \quad (1)$$

式中: \mathbf{A} 为 $n \times n$ 维状态转移矩阵; \mathbf{B} 为 $n \times m$ 维输入转移矩阵; $\mathbf{X}(k)$ 为 n 维目标状态向量; $\mathbf{w}(k)$ 为 m 维过程噪声,服从 $N(0, \mathbf{Q})$ 的高斯分布; \mathbf{Q} 为噪声协方差矩阵。观测方程为:

$$\mathbf{Z}(k) = \mathbf{H}\mathbf{X}(k) + v(k) \quad (2)$$

式中: \mathbf{H} 为 $m \times n$ 的传感器测量矩阵; $\mathbf{Z}(k)$ 为 m 维测量向量; $v(k)$ 为 m 维的测量噪声,且 $v(k) \sim N(0, \mathbf{R})$, \mathbf{R} 为协方差矩阵; $\mathbf{w}(k)$ 和 $v(k)$ 相互独立。根据Kalman滤波器可以得到该系统的状态预测与测量预测为:

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1|k) = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}}(k|k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{Z}}(k+1|k) = \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}(k+1|k) \quad (4)$$

状态更新方程为:

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1|k+1) = \mathbf{X}(k+1|k) + \mathbf{K}(k+1)\mathbf{e}(k+1) \quad (5)$$

其中 $\mathbf{K}(k+1)$ 为卡尔曼增益。

Kalman滤波器的真实的测量值与测量预测值之差称为新息 $\mathbf{e}(k+1)$,由下式给出。

$$\mathbf{e}(k+1) = \mathbf{Z}(k+1) - \hat{\mathbf{X}}(k+1|k) \quad (6)$$

此新息具有以下3个性质^[30]:

1) $\mathbf{e}(k+1)$ 和 $v(k)$ 一样,也是一个独立同分布过程,其方差为:

$$\mathbf{S}(k+1|k) = \mathbf{H}\mathbf{P}(k+1|k)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}(k) \quad (7)$$

其中 $\mathbf{P}(k+1|k) = \mathbf{A}\mathbf{P}(k|k)\mathbf{A}^T + \mathbf{Q}(k)$ 。

2) 新息序列与观测信息正交:

$$\mathbf{E}\{\hat{\mathbf{e}}(k)\mathbf{Z}(m)\} = 0 \quad m < k \quad (8)$$

3) 新过程 $\{\hat{\mathbf{e}}(k)\}$ 与原观测过程 $\{\mathbf{Z}(k)\}$ 所张成的线性流形相同。

根据式(5)卡尔曼滤波的状态更新方程,获得新的观测值 $\mathbf{Z}(k+1)$ 后,其相应的新息 $\mathbf{e}(k+1)$ 以线性加权的方式对状态预测结果进行修正。即当观测值 $\mathbf{Z}(k+1)$ 为正常值时,新息会对 $k+1$ 时刻的状态预测进行 $\mathbf{K}(k+1)$ 倍的正确修正;而当观测值为野值时,其新息对滤波

值进行 $\mathbf{K}(k+1)$ 倍的修正为错误修正,从而导致滤波值严重偏离距离信息的真实状态。

根据新息序列性质2),当观测中野值出现时会破坏其正交性,据此来消除其影响。新息可进一步展开为:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}(k) &= \mathbf{Z}(k) - \hat{\mathbf{Z}}(k|k-1) = \\ &= \mathbf{Z}(k) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}(k|k-1) = \\ &= \mathbf{H}\mathbf{X}(k) + v(k) - \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}(k|k-1) = \\ &= \mathbf{H}\tilde{\mathbf{X}}(k|k-1) + v(k) \end{aligned} \quad (9)$$

其中, $\tilde{\mathbf{X}}(k|k-1) = \mathbf{X}(k) - \hat{\mathbf{X}}(k|k-1)$ 。

所以有 $\mathbf{E}[\mathbf{e}(k)\mathbf{e}^T(k)] = \mathbf{H}\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T + \mathbf{R}$,另有 $\hat{\mathbf{Z}}(k|k-1) = \mathbf{H}\hat{\mathbf{X}}(k|k-1)$ 。根据如下正交性原理,

$$\begin{aligned} D &= \mathbf{E}[\mathbf{Z}(k)\mathbf{Z}^T(k)] = \mathbf{E}[\mathbf{e}(k)\mathbf{e}^T(k)] + \mathbf{E}[\hat{\mathbf{Z}}(k|k-1)\hat{\mathbf{Z}}^T(k|k-1)] \\ &= \mathbf{H}\mathbf{P}(k|k-1)\mathbf{H}^T + \mathbf{R} + \mathbf{H}\mathbf{X}(k|k-1)\mathbf{X}^T(k|k-1)\mathbf{H}^T \end{aligned} \quad (10)$$

考虑到在计算过程中由于噪声或计算等原因引入的误差,本文对新的观测值是否是野值按照下式进行判断,作假设 H_0 和 H_1 。

$$\begin{cases} H_0: \mathbf{E}[\mathbf{Z}(k)\mathbf{Z}^T(k)] \in [D(1-\delta), D(1+\delta)] \\ H_1: \mathbf{E}[\mathbf{Z}(k)\mathbf{Z}^T(k)] \notin [D(1-\delta), D(1+\delta)] \end{cases} \quad (11)$$

其中, δ 是引入的一个小的扰动量,其取值根据实际情况而定,尽量小一些。假设 H_0 成立时,则认为观测值中没有野值出现;假设 H_1 成立时,则认为滤波系统处于非正常状态,观测值中有野值出现,需要对野值进行一定的修正处理。

根据新息序列的性质,对Kalman滤波算法进行修正,当测量值为野值时,根据测距信息的特点,采用线性补偿的方法重新构造状态估计,有:

$$\hat{\mathbf{X}}(k+1|k+1) = 2\hat{\mathbf{X}}(k|k) - \hat{\mathbf{X}}(k-1|k-1) \quad (12)$$

1.2 虚拟移动长基线定位

获得足够的有效距离信息后,基于潜水器的移动矢径和母船的GPS信息,利用虚拟信标的概念构建如图1所示虚拟移动长基线定位系统。通过潜水器在前进过程中与母船的多次测距,构建出其某时刻位置估计的多个约束,通过最小二乘法解算得到潜水器当前位置。

1) 定位解算

同长基线定位一样,虚拟移动长基线定位系统需要有至少3组距离和虚拟信标位置信息,为了提供必要的冗余,这里选用4个时刻的潜水器与母船的测距信息。虚拟信标的构建过程如下:假设移动信标和潜水器的移动轨迹对应时刻 T_1 到 T_4 , T_4 为当前时刻,根据移动信标当前时刻的位置及其运动轨迹,联合潜水器的移动矢径,

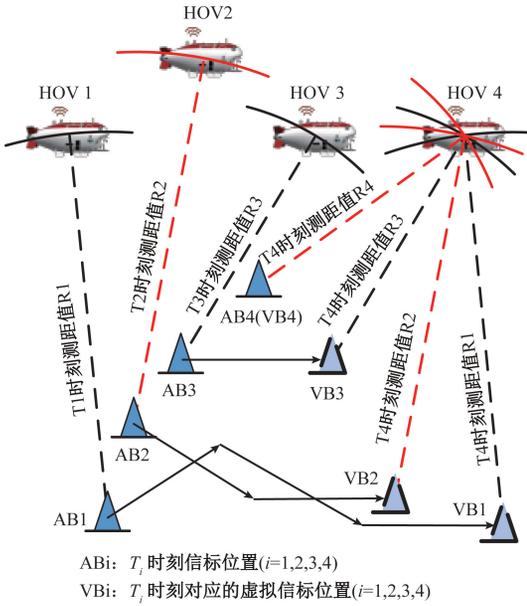


图 1 虚拟移动长基线定位

Fig.1 VMLBL system geometry

计算得到虚拟信标的位置信息。虚拟信标位置的计算如下^[10]:

$$VB_i = AB + \sum_i v_i dt_{(i,i+1)} - \sum_i V_i dt_{(i,i+1)} \quad (13)$$

式中: $dt_{(i,i+1)}$ 是 T_i 时刻和 T_{i+1} 时刻之间的时间延迟; V_i 是移动信标在 T_i 时刻的速度; v_i 是潜水器在 T_i 时刻的速度; AB 是移动信标的当前(T_4)时刻位置; R_i 是 T_i 时刻被定位目标与移动信标的测距信息; VB_i 是对应于测距信息 R_i 的虚拟信标位置。式(13)也可以写为:

$$VB_i = AB_i + \sum_{n=i}^3 v_n dt_{(n,n+1)} \quad i = 1,2,3,4 \quad (14)$$

式中: AB_i 是存储的移动信标在 T_i 时的位置。

利用得到的虚拟信标的位置,结合当时的测距信息,利用最小二乘法进行球面交汇方程的解算得到被定位目标的位置。

设构造的虚拟基阵信标的坐标为 $(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, 3, 4$, 潜水器的位置坐标为 (x, y, z) , 设 c 为水下声速, t_i 为 i 号虚拟声信标与载人潜水器之间的单程传播时延, r_i 为 i 号虚拟声信标与载人潜水器之间的距离, 并且 $r_i = t_i \times c, i = 1, 2, 3, 4$, 在此不考虑声线弯曲因素影响。根据几何位置关系, 有如下方程组:

$$\begin{cases} (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = r_1^2 \\ (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = r_2^2 \\ (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = r_3^2 \\ (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 = r_4^2 \end{cases} \quad (15)$$

潜水器深度可以通过压力传感器来获得, 令其深度 $z = h$ 。经过降次处理, 得到二元一次方程组。

$$\begin{bmatrix} (x_2 - x_1) & (y_2 - y_1) \\ (x_3 - x_2) & (y_3 - y_2) \\ (x_4 - x_3) & (y_4 - y_3) \\ (x_1 - x_4) & (y_1 - y_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} (r_1^2 - r_2^2 + d_2^2 - d_1^2)/2 - h(z_2 - z_1) \\ (r_2^2 - r_3^2 + d_3^2 - d_2^2)/2 - h(z_3 - z_2) \\ (r_3^2 - r_4^2 + d_4^2 - d_3^2)/2 - h(z_4 - z_3) \\ (r_4^2 - r_1^2 + d_1^2 - d_4^2)/2 - h(z_1 - z_4) \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中: $d_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2}, i = 1, 2, 3, 4$ 。式(16)可记作 $AX = B$, 当矩阵 $A^T A$ 为可逆阵时, 根据最小二乘法, 可得到潜水器的位置估计为:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T B \quad (17)$$

虚拟信标的几何分布会影响定位系统的可观测性。基于虚拟移动长基线的潜水器定位模型中, 由于取样间隔内潜水器航行距离通常远小于它与信标之间的距离信息, 系数矩阵奇异, 导致用最小二乘法进行定位解算时矩阵不可逆, 方程无解。这时可以通过增大取样间隔, 增加不同的虚拟信标的几何分离程度, 提高解算矩阵的“健康”程度。利用单信标的测距信息, 潜水器定位系统是局部可观测的, 而非全局可观测的^[10]。也就是可以得到两个解, 可通过合适的初值舍掉一个, 得到潜水器的真实位置。若要系统可观测, 虚拟信标轨迹不能与潜水器共线。

2) 定位误差影响因素分析

影响算法定位误差的因素有虚拟信标位置误差、距离信息测量误差和潜水器深度测量误差等, 如图 2 所示。

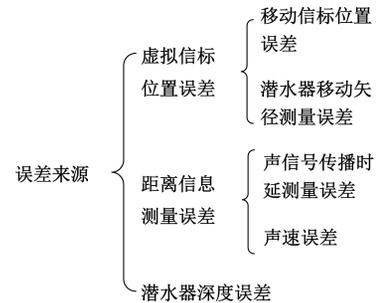


图 2 定位误差影响因素

Fig.2 Influence factors on positioning error

由式(14)可知, 虚拟信标位置误差来源有移动信标位置误差和潜水器移动矢量测量误差。移动信标位于水面时通过 GPS 实现定位。由于单个距离信息不能实现位置确定, 需要联合潜水器的移动矢量实现定位, 因此潜水器航位推算误差会影响系统定位精度。

由式(15)可知, 距离信息测量误差包含声信号传播时延测量误差和声速误差。一方面, 声信号容易遭受水

声信道和背景噪声的影响导致时延测量误差;另一方面,当水下载体发射测距信号时,声线总是向着声速减小的方向弯曲,采用恒定声速将传播时间转换为距离也会引起测距误差。

此外潜水器深度信息由深度传感器提供,深度误差直接影响潜水器定位精度。

1.3 定位结果滤波

基于虚拟移动长基线直接解算出的潜水器位置是有较大跳跃的,为平滑估计结果,级联卡尔曼滤波进行信号处理。原理与1.1节野点剔除原理相同。

2 仿真和试验结果

假设运动时间为1200s,采样周期为1s,母船的运动轨迹为转弯率0.3的先右转后左转的S型路线,初始北向速度和东向速度均为2m/s,潜水器轨迹为斜直线运动,初始北向速度和东向速度均为1m/s,潜水器和母船速度大小恒定。首先利用修正卡尔曼滤波对测距信息的野点进行修正,系统噪声 $w(k)$ 和观测噪声 $v(k)$ 是均值为0,方差为2的平稳高斯白噪声。为证明野值剔除算法的有效性,在300s时刻插入幅值为80的10个野值,在700s时刻插入幅值为80的20个野值,分别对应于野值在单侧出现和野值在双侧出现两种情况,扰动量 δ 设为0.03。

图3和4所示为测距信息经过普通卡尔曼滤波和修正卡尔曼滤波处理后的结果曲线及两种滤波方法系统状态估计与实际系统状态误差曲线。根据仿真结果,可以看出,修正卡尔曼滤波可以更好地抑制野值,鲁棒性十分明显。图5所示为利用构建的虚拟移动长基线定位系统估计的潜水器位置。仿真结果表明该算法在一定误差范围内可实现潜器定位。

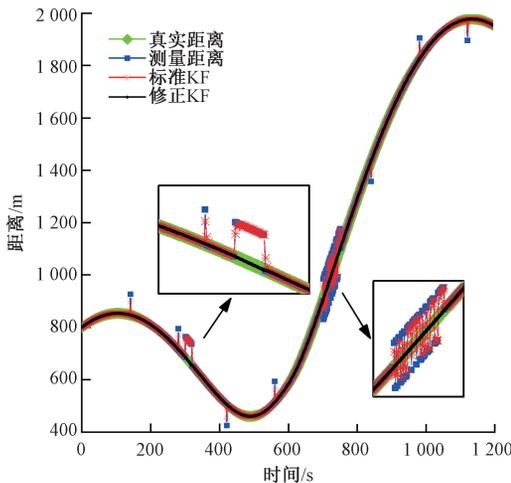


图3 仿真潜水器和母船距离信息

Fig.3 Range information between HOV and ship

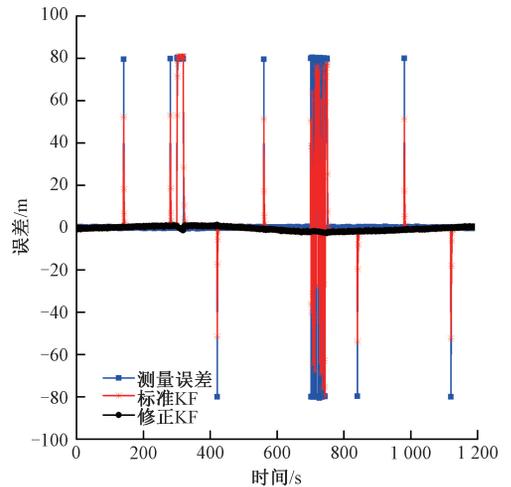


图4 潜水器和母船距离误差

Fig.4 Error of range information

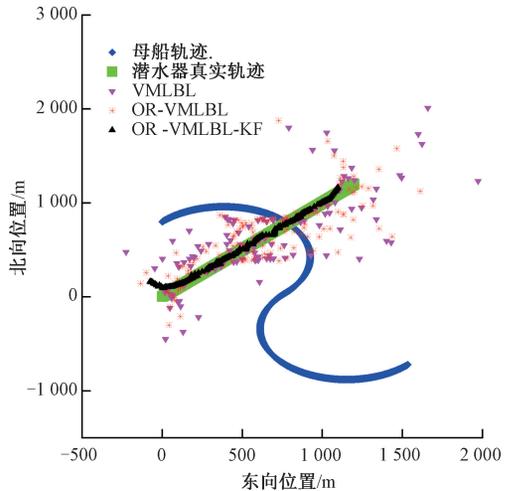
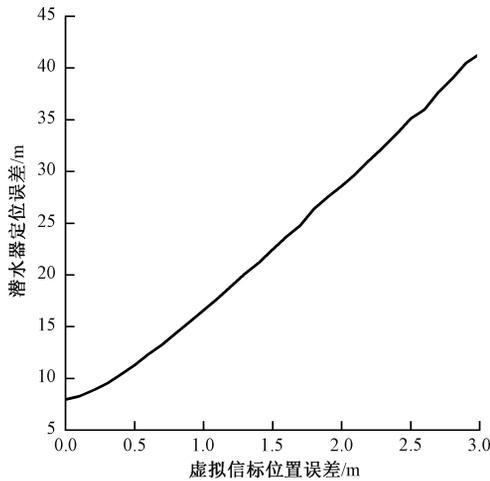


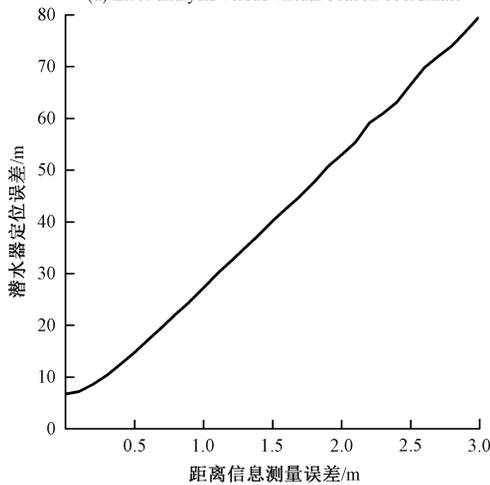
图5 潜水器定位结果

Fig.5 The estimated position of HOV

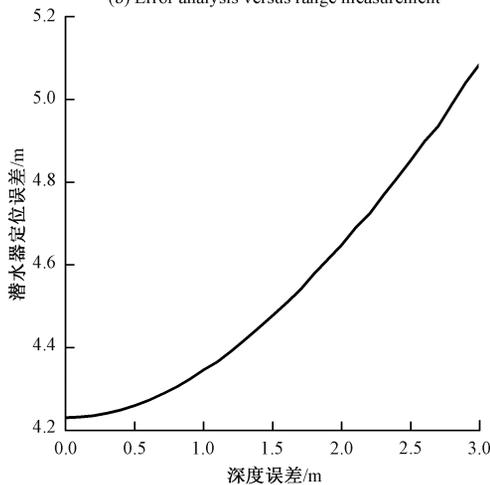
为分析不同因素对定位系统的影响程度,进行次数为50000次的蒙特卡洛试验。图6所示为各因素对定位误差影响的仿真结果,由图6可知,定位误差随影响误差各因素误差的增加而增加,且随着影响因素误差的增加,趋于一种线性递增关系。但同时定位误差受不同因素影响的程度又各不相同。单位(1m)虚拟信标误差带来定位误差约为10m,单位距离信息误差对定位误差的影响大于20m,单位深度误差带来的误差则小于1m。因此系统定位误差最容易受距离信息测量误差的影响,受虚拟信标位置误差影响程度次之,对深度误差鲁棒性较好。为减小定位误差,提高系统定位精度,可以选用如扩频技术、自适应均衡技术等抗衰落、抗多途的信号检测与估计技术,以及在潜水器安装高精度惯导设备和高精度深度传感器等。



(a) 虚拟信标位置误差和定位误差的关系
(a) Error analysis versus virtual beacon coordinate



(b) 距离信息测量误差和定位误差的关系
(b) Error analysis versus range measurement



(c) 深度误差和定位误差的关系
(c) Error analysis versus depth

图 6 误差分析

Fig.6 Error analysis

线定位系统给出的潜水器轨迹,受船体噪声及当次海试海况影响,超短基线定位系统不是在最佳状态下工作,定位结果存在少量跳点。先对得到的距离信息进行滤波处理,剔除其中的野值,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,标准卡尔曼滤波和去野值卡尔曼滤波都能对距离信息进行一定的平滑作用,但当野值出现时,修正卡尔曼滤波算法能够有效剔除单个以及连续成片野值的影响,使得到的距离信息更平滑、有效。

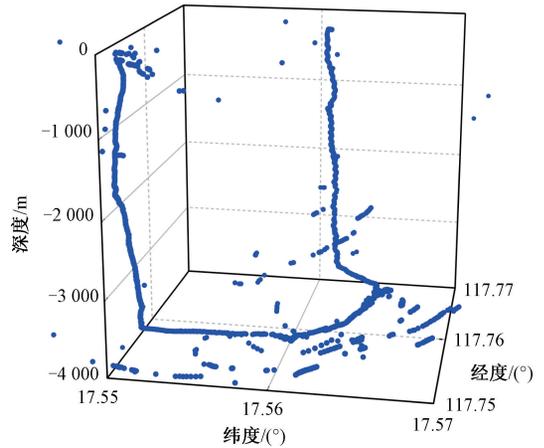


图 7 USBL 测量的“蛟龙”号轨迹

Fig.7 The position of 'Jiaolong' provided by the USBL

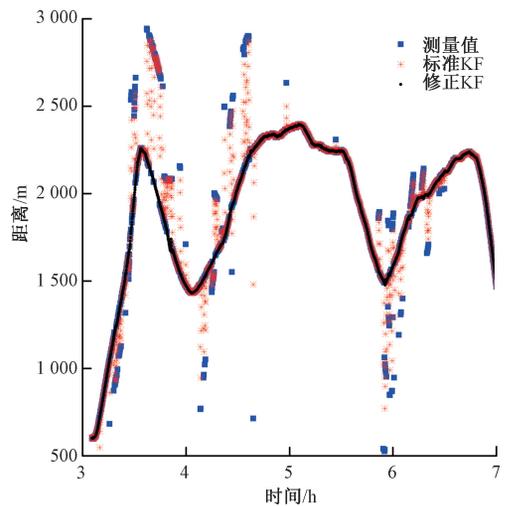


图 8 “蛟龙”号与母船测距信息处理

Fig.8 Range information between 'Jiaolong' and mother ship

在得到足够的测距信息后,采用最小二乘法对潜水器位置进行解算,对解算结果进行滤波处理,得到如图 9 所示的定位结果。图示是“蛟龙”号近海底定位轨迹图,其中“■”代表超短基线给出的定位结果(剔除野点后),“*”代表经过滤波剔除测距信息的野点后构建虚拟移动长基线(OR-VMLBL)通过最小二乘给出的定位结果;

选用“蛟龙”号 2013 年 7 月 3 日在中国南海第 58 潜次试验数据进行算法验证,图 7 所示为当次海试超短基

“▲”代表在上面的基础上再级联 Kalman 滤波 (OR-VMLBL-KF) 剔除野值并进行修正后的定位结果。从图 9 可以看出提出的定位算法与目前蛟龙号使用的超短基线定位系统给出的定位结果拟合较好, 可以作为超短基线的辅助定位手段, 在定位系统由于外部不可抗力等因素暂时不可用时实现紧急情况下的潜水器定位。图 10 所示为 OR-VMLBL 和 OR-VMLBL-KF 两种定位算法在不同误差范围内有效数据个数和数据有效率, 总数据个数为: 1 768 个。OR-VMLBL-KF 算法在定位精度和有效数据率方面都有提升, 误差在 10% 内的数据有效率可以达到 95.1%。可以看到 OR-VMLBL-KF 算法能有效追踪潜水器位置, 定位效果良好。在一定误差范围内可以提供有效的潜水器定位, 保障潜水器安全。

3 结 论

本文介绍了一种基于虚拟移动长基线定位算法的载人潜水器定位算法, 对定位算法影响因素进行分析, 并通过仿真对比说明了定位解算前进行野点剔除, 及定位解算后进行滤波平滑的必要性。算法无需进行方位测量及海底基阵的布放, 提高了测量数据的可靠性, 降低定位成本, 广泛适用于潜水器执行各种任务的需求。试验结果证明了算法的有效性。此外, 潜水器回收阶段的准确定位对潜水器安全也至关重要, 将在后面的工作中进一步研究。

参考文献

[1] 孙大军, 郑翠娥, 钱洪宝, 等. 水声定位系统在海洋工程中的应用[J]. 声学技术, 2012, 31(2): 125-132.
SUN D J, ZHENG C E, QIAN H B, et al. The application of underwater acoustic positioning systems in ocean engineering [J]. Technical Acoustics, 2012, 31(2): 125-132.

[2] 崔维成, 刘峰, 胡震, 等. 蛟龙号载人潜水器的 7 000 米级海上试验[J]. 船舶力学, 2012, 16(10): 1131-1143.
CUI W CH, LIU F, HU ZH, et al. 7 000 m sea trials test of the deep manned submersible “Jiaolong” [J]. Journal of Ship Mechanics, 2012, 16(10): 1131-1143.

[3] 朱维庆, 朱敏, 武岩波, 等. 载人潜水器“蛟龙”号的水声通信信号处理[J]. 声学学报, 2012, 37(6): 565-573.
ZHU W Q, ZHU M, WU Y B, et al. Signal processing in underwater acoustic communication system for manned deep submersible “Jiaolong” [J]. Acta Acustica, 2012, 37(6): 565-573.

[4] 朱敏, 张同伟, 杨波, 等. 蛟龙号载人潜水器声学系统[J]. 科学通报, 2014, 59(35): 3462-3470.
ZHU M, ZHANG T W, YANG B, et al. Sonar system of Jiaolong human-occupied vehicle [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(35): 3462-3470.

[5] 张同伟, 刘焯瑶, 唐嘉陵, 等. 大深度载人潜水器之超短基线定位系统: 海上试验及载人深潜应用[J/OL]. 应用基础与工程科学学报, 2019: 1-14 [2019-07-07].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3242.TB.20190121.2148.004.html>.

ZHANG T W, LIU Y Y, TANG J L, et al. Ultra-short baseline for manned deep-sea submersibles: sea trial and its application [J/OL]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019: 1-14 [2019-07-07].
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3242.TB.20190121.2148.004.html>.

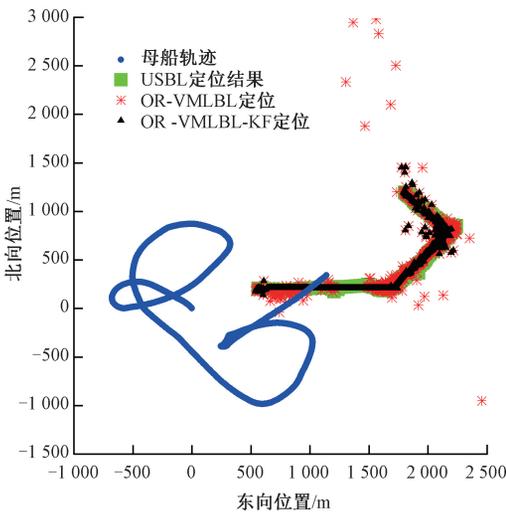


图9 基于 VMLBL 的“蛟龙”号近海底航行时定位结果
Fig.9 The estimated position of ‘Jiaolong’ near the bottom of the sea using VMLBL

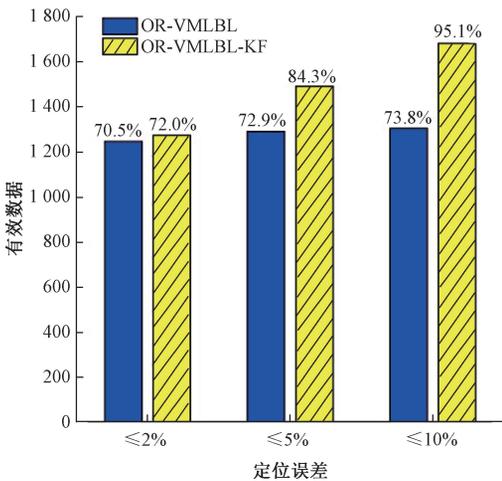


图10 基于 VMLBL 的“蛟龙”号近海底定位结果分析
Fig.10 Analysis of the estimated position of “Jiaolong” near the bottom of the sea using VMLBL

- [6] 孙大军,郑翠娥,张居成,等.水声定位导航技术的发展与展望[J].中国科学院院刊, 2019, 34(3): 331-338.
SUN D J, ZHENG C E, ZHANG J CH, et al. Development and prospect for underwater acoustic positioning and navigation technology [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(3): 331-338.
- [7] 韩云峰,郑翠娥,孙大军.长基线声学定位系统跟踪解算优化方法[J].声学学报, 2017, 42(1): 14-20.
HAN Y F, ZHENG C E, SUN D J. An optimized estimation method in long baseline acoustic positioning system [J]. Acta Acustica, 2017, 42(1): 14-20.
- [8] LARSEN M B. Synthetic long baseline navigation of underwater vehicles [C]. Oceans 2000 MTS/IEEE, Providence, RI, USA, 2000: 2043-2050.
- [9] ALEXANDER P S. The AUV positioning using ranges from one transponder LBL[C]. Oceans 1995 MTS/IEEE, San Diego, California, USA, 1995: 1620-1623.
- [10] LAPOINTE C E. Virtual long baseline (VLBL) autonomous underwater vehicle navigation using a single transponder [D]. Cambridge, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [11] TAN Y T, GAO R, CHITRE M. Cooperative path planning for range-only localization using a single moving beacon[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(2): 371-385.
- [12] 曹俊,郑翠娥,孙大军,等. AUV 直线航迹下的单信标测距定位[J].哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(5): 733-738.
CAO J, ZHENG C E, SUN D J, et al. AUV positioning based on single-beacon ranging in straight-line trajectory [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(5): 733-738.
- [13] 朱子尧,韩树平,黄锐,等.一种基于移动矢径的单信标测距定位算法[J].舰船科学技术, 2019, 41(3): 119-123.
ZHU Z Y, HAN SH P, HUANG R, et al. A single beacon distance measurement location algorithm based on motion radius vector[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(3): 119-123.
- [14] 陈韶华,赵冬艳,陈川.海洋声学环境下水中声源的时延估计法定位精度分析[J].声学学报, 2014, 39(5): 549-556.
CHEN SH H, ZHAO D Y, CHEN CH. Precision analysis for underwater sound source localization in ocean acoustic environment with time delay estimation method[J]. Acta Acustica, 2014, 39(5): 549-556.
- [15] 李壮,乔钢,何超,等.结合主动时间反转算法的短基线定位研究[J].声学学报, 2013, 38(3): 287-293.
LI ZH, QIAO G, HE CH, et al. The research of short baseline positioning integration of time-reversal mirror[J]. Acta Acustica, 2013, 38(3): 287-293.
- [16] 王鼎杰,孟德利,李朝阳,等.抗野值自适应卫星/微惯性组合导航方法[J].仪器仪表学报, 2017, 38(12): 2952-2958.
WANG D J, MENG D L, LI CH Y, et al. Anti-wild adaptive satellite /micro inertial integrated navigation method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(12): 2952-2958.
- [17] 张国强,鲁昌华,李燕,等.小波变换与改进 Kalman 在北斗/SINS 组合导航中的研究[J].电子测量与仪器学报, 2019, 33(7): 65-71.
ZHANG G Q, LU CH H, LI Y, et al. Research on wavelet transform and improved Kalman in Beidou/SINS integrated navigation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(7): 65-71.
- [18] 刘昊,陈光武,魏宗寿,等.改进的最小二乘自适应滤波陀螺仪去噪方法[J].仪器仪表学报, 2018, 39(4): 107-114.
LIU H, CHEN G W, WEI Z SH, et al. Gyro denoising method based on least squares adaptive filter [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 107-114.
- [19] ZHANG Y, MERATNIA N, HAVINGA P. Outlier detection techniques for wireless sensor networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2010, 12(2): 159-170.
- [20] ZHANG X, CUI X, YAN D. Application of modified Kalman filtering restraining outliers based on orthogonality of innovation to track tester[C]. 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, 2016: 171-175.
- [21] CHENG K H M, KUMAR A. Revisiting outlier rejection approach for non-lambertian photometric stereo[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 28(3): 1544-1555.
- [22] XIAO J, LIU M, XU Y. A modified square-root unscented Kalman filter restraining outliers [C]. International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence, Xiamen, China, 2012: 133-137.
- [23] NIGAM N, SAXENA T, RICHHARIYA V. Global high dimension outlier algorithm for efficient clustering & outlier detection [C]. 2016 Symposium on Colossal Data Analysis and Networking, Indore, Madhya Pradesh, India, 2016: 1-5.
- [24] QIAO G, LI Z, SUN Z, et al. Kalman filter restraining outliers for short baseline system[C]. Proceedings of the

- 10th World Congress on Intelligent Control and Automation, Beijing, China, 2012: 322-325.
- [25] CAO J, ZHENG C E, SUN D J, et al. Travel time processing for LBL positioning system [C]. 2016 IEEE/OES China Ocean Acoustics Symposium, Harbin, China, 2016: 1-4.
- [26] 张勋, 边信黔, 严浙平, 等. UUV 水流观测数据融合与可视化技术研究 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(1): 57-62.
- ZHANG X, BIAN X Q, YAN ZH P, et al. Study on data fusion and visualization technology of UUV current observation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(1): 57-62.
- [27] 杨金显, 陈超, 李志鹏. 基于小波卡尔曼混合算法的陀螺仪去噪方法 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(3): 29-33, 37.
- YANG J X, CHEN CH, LI ZH P. Detection method of gyro based on wavelet Kalman hybrid algorithm [J]. Electronic Measurement Technique, 2016, 39(3): 29-33, 37.
- [28] YUN T L, YING W, LEI S, et al. Quantization noise consideration and characterization in sigma-delta MEMS accelerometer [J]. Microelectronics Journal, 2016, 47(C): 53-60.
- [29] 李峥, 李宇, 黄勇, 等. 水下目标自主连续跟踪与定位算法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 520-528.
- LI ZH, LI Y, HUANG Y, et al. Study of automatic continuous tracking and location algorithm for underwater target [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(3): 520-528.
- [30] 柳海峰, 姚郁. Kalman 滤波抗野值方法研究 [J]. 计算机自动测量与控制, 2001, 9(6): 60-64.

LIU H F, YAO Y. Study for outliers based on Kalman filtering [J]. Computer Automated Measurement & Control, 2001, 9(6): 60-64.

作者简介



尤晓艳, 2008 年于山东师范大学获得学士学位, 现为中国科学院声学研究所博士研究生, 主要研究方向为水声定位。

E-mail: youxiaoyan14@malisucas.ac.cn

You Xiaoyan received her B.Sc. degree from Shandong Normal University in 2008. She is currently a Ph.D. candidate at Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences. Her main research interests include signal underwater acoustic localization.



朱敏 (通信作者), 1994 年于中国科学技术大学获得学士学位, 2001 年和 2006 年于中国科学院研究生院获得硕士和博士学位, 现为中国科学院声学研究所研究员、博士生导师, 主要研究方向为水声通信及组网技术、声学探测技术和水下载体声学系统集成。

E-mails: zhumin@mail.ioa.ac.cn

Zhu Min (Corresponding author) received his B.Sc. degree from University of Science and Technology of China in 1994, received his M.Sc. degree and Ph.D. degree both from Graduate University of Chinese Academy of Sciences in 2001 and 2006, respectively. He is currently a professor and a Ph.D. advisor at Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include underwater acoustic communication and networking technology, acoustic detection technique and underwater acoustic system integration.