DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201607062

主从式 USV 协同定位系统性能分析

于 飞,范世伟,李 倩,郝 强,姜 畔

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,哈尔滨 150001)

摘 要:为研究以距离为观测量的主从式无人水面航行器(unmanned surface vehicle, USV)协同定位系统在不同运动状态下的定位性能问题,建立一种新的协同坐标系,并在该坐标系中推导主从 USV 运动模型,以主从 USV 相对距离为观测量分析主从式 USV 协同定位系统的可观测性及可观测度.同时,针对不可观测路径,提出通过改变控制输入的方法以达到提高系统可观测度的目的.通过 MATLAB 仿真实验与水面舰艇实验,结果表明:在不同情况下,通过调整控制输入的方法改变系统的可观测度是有效的;利用所提出的分析方法可以反映协同定位系统的定位性能,验证了所得结论及方法的有效性.

关键词:无人水面航行器;协同定位;性能分析;控制输入;可观测性

中图分类号: U666 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2017)09-0129-07

Performance analysis of leader-follower USVs' cooperative localization system

YU Fei, FAN Shiwei, LI Qian, HAO Qiang, JIANG Pan

(School of Electrical Engineeringand Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper studies the performance analysis of the multiple USVs' cooperative localization system based on the relative distance measurements with a single leader under different maneuver conditions. In order to analyze the performance of the cooperative localization system quantitatively, a new cooperative coordinate is established and motion models of the leader and follower USVs are derived. Furthermore, the USV cooperative localization system's observability and the degree of observability is analyzed. In addition, aiming at unobservable paths, a method about changing control input is proposed to improve the degree of observability. Through MATLAB simulation experiment and water experiment results show that under different conditions, by adjusting the control input method to change the system observability is effective. And the results show that the analysis method proposed in this paper can reflect the positioning performance of cooperative positioning system, verify the effectiveness of this method.

Keywords: USV; cooperative localization; performance analysis; control input; observability

无人水面航行器(USV)是近些年伴随着军事需 求而新兴发展的产物.USV 通过搭载不同类型的传 感器或设备模块,可以完成情报搜集、水上监视、无人 侦察、反水雷等不同的任务^[1].单体USV 难以完成日 益复杂的任务,从而有必要通过多USV 协同作业共 同完成任务使命.多USV 进行协同作业的首要问题 是实现各单体USV 精确定位.文献[2]研究了基于长 基线的多无人艇协同定位算法,将从艇与两个主艇之 间的距离值作为观测量能显著提高定位精度;文献 [3]提出一种基于双水听器的多自主航行器协同导航 方法;文献[4]提出一种基于 Kullback-Leiber 距离的 单主艇协同导航算法,并通过大量水上试验验证了算 法有效性;文献[5-8]则采用相邻时刻的运动矢径作 为观测量来实现单主艇协同定位.

协同定位过程的本质是状态预测,而各状态的 可观测性及可观测度与系统定位性能存在着紧密关 系,所以分析系统的可观测性及可观测度具有重要 意义. 文献 [9] 对固定单信标定位系统进行了基于 李导数的可观测性分析,表明只要作为量测量的距 离矢量方向随时间一直变化,那么定位系统就是可 观的,即艇位置信息可估;文献[10]分析了基于距 离测量的主从式 AUV 协同定位系统可观测性,表明 从艇控制输入均不为零且主从艇不在同一直线上航 行时系统可观,并且分析了不同控制输入下系统的 可观测性. 值得注意的是, 文献 [9-10] 虽然使用了 非线性可观测性分析方法,避免了可观测性条件不 充分的问题,但是都没有进一步分析系统可观测度, 从而缺少对系统定位性能的定量分析. 文献[11]基 于条件数分析了多自主水下航行器协同定位系统的 可观测度,但是并没有考虑控制输入对协同定位系 统可观测度的影响. USV 改变控制输入时会影响协 同定位系统可观测度的变化,甚至会使系统从可观

收稿日期:2016-07-07

基金项目:国家自然科学基金(51509063)

作者简介:于飞(1974—),男,教授,博士生导师

通信作者:范世伟, fanshiwei1993@163.com

將式

变为不可观测. 所以,脱离控制输入单纯讨论协同 定位系统的可观测性及可观测度是不合理的. 更为 重要的是,上述文献多是在惯性坐标系中进行系统 可观测性分析,由于在惯性坐标系中主从 USV 都存 在状态变化,使得主从艇状态无法解耦,从而导致分 析过程较为复杂,甚至会导致可观测性分析结论片 面的问题. 针对以上问题,本文以相对距离为观测 量的主从式 USV 协同定位系统为研究对象,提出在 协同坐标系下分析系统可观测性及可观测度,进而 定量研究协同定位系统的定位性能. 同时,提出通 过在协同坐标系中调整控制输入的方式改变系统的 可观测性,进而改善系统的定位性能.

1 主从式 USV 运动学模型

由于 USV 在水面航行,所以主从式 USV 协同 定位系统的定位问题是二维平面内的定位问题. 在 主从式 USV 协同定位系统中,主 USV 搭载高精度 导航设备,可以实现精确定位,从 USV 搭载低精度 导航设备,需要获得与主 USV 间的距离信息并利用 数据融合技术来提高自身定位精度. 图 1 为基于距 离量测的主从式 USV 协同定位系统,图中 Σ_1 为二 维惯性坐标系,定义 USV 艏艉向与惯性坐标系的 X₁ 轴夹角为航向角,以逆时针方向为航向角正向.定 义 Σ_{cr} 为二维协同坐标系,以主 USV 重心为协同坐 标系原点,其x轴方向指向主USV 航行方向,y轴垂 直于 x 轴并指向主 USV 左侧. 根据以上定义可以看 出,协同坐标系跟随主 USV 艇体相对惯性坐标系运 动,同时主 USV 相对协同坐标系静止且始终位于协 同坐标系原点. 主 USV 在惯性坐标系中的位置为 (X_{m}, Y_{m}) ,从 USV 在惯性坐标系中的位置为 (X,Y), 以从 USV 的二维位置坐标作状态变量,将惯性 坐标系中从 USV 的状态投影到协同坐标系可得

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\psi_{m} & \sin\psi_{m} \\ -\sin\psi_{m} & -\cos\psi_{m} \\ \cos\psi_{m} & -\sin\psi_{m} \\ \sin\psi_{m} & \cos\psi_{m} \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} \dot{X}_{m}(t) \\ \dot{Y}_{m}(t) \\ \dot{X}(t) \\ \dot{Y}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{m}\sin\psi_{m} & \omega_{m}\cos\psi_{m} \\ -\omega_{m}\cos\psi_{m} & \omega_{m}\sin\psi_{m} \\ -\omega_{m}\sin\psi_{m} & -\omega_{m}\cos\psi_{m} \\ \omega_{m}\cos\psi_{m} & -\omega_{m}\sin\psi_{m} \end{bmatrix}^{T} \begin{bmatrix} X_{m}(t) \\ Y_{m}(t) \\ X(t) \\ Y(t) \end{bmatrix}. (2)$$



Fig.1 Leader-follower USVs' cooperative localization system 式中 ω_m 为主 USV 的航向角速度, $X_m(t)$ 、 $Y_m(t)$ 、 X(t)、Y(t)可以分别表示为

$$\begin{cases} \dot{X}_{m}(t) = V_{m}\cos\psi_{m}, \\ \dot{Y}_{m}(t) = V_{m}\sin\psi_{m}, \\ \dot{X}(t) = V\cos\psi, \\ \dot{X}(t) = V\cos\psi, \\ \dot{Y}(t) = V\sin\psi. \end{cases}$$
(3)代人式(2)中,可得

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \vdots \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ \cos(\psi - \psi_{\rm m}) & \sin(\psi - \psi_{\rm m}) \\ \sin \psi_{\rm m} & \cos \psi_{\rm m} \\ -\cos \psi_{\rm m} & \sin \psi_{\rm m} \\ -\sin \psi_{\rm m} & -\cos \psi_{\rm m} \\ \cos \psi_{\rm m} & -\sin \psi_{\rm m} \end{bmatrix}^{\rm T} \begin{bmatrix} V_{\rm m} \\ V \\ X_{\rm m} \omega_{\rm m} \\ Y_{\rm m} \omega_{\rm m} \\ X \omega_{\rm m} \\ Y \omega_{\rm m} \end{bmatrix},$$
(4)

进而可以得到从 USV 在协同坐标系中的速度为

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}.$$
 (5)

其中 $v_1 = \dot{x}(t), v_2 = \dot{y}(t),$ 可由式(4)得到.

从 USV 在协同坐标系中的航向角记为 γ,该航 向角定义为从 USV 的速度矢量与主 USV 的速度矢 量之差与协同坐标系 x 轴之间的夹角.进一步,可以 利用从 USV 在协同坐标系中的速度 v₁、v₂ 表示出从 USV 在协同坐标系中的航向角 γ 为

$$\gamma = \begin{cases} \arctan \frac{v_2}{v_1}, & v_1 > 0; \\ \arctan \frac{v_2}{v_1} + \pi, & v_1 < 0; \\ \frac{\pi}{2}, & v_1 = 0, v_2 > 0; \\ -\frac{\pi}{2}, & v_1 = 0, v_2 < 0. \end{cases}$$
(6)

至此,将主从 USV 的位置、速度及航向角全部

投影到协同坐标系中.在协同坐标系中,主艇的位置始终为坐标系原点,从而可以将其看作是一个固定信标,这样惯性坐标系中主从 USV 间的相对运动信息都转化到协同坐标系中的从 USV 上.基于这种建模方式进行系统可观测性及可观测度分析可以大 大简化分析过程,而且还充分考虑了主从 USV 的相对速度大小、相对航向及相对位置对系统可观测性 的影响,使得可观测性条件的充分性得到保障.

2 协同定位系统性能分析

系统可观测是其状态可估的前提,不可观测系统 的定位误差将随时间的推移而不断增长,并最终使协 同定位系统失去稳定性^[12].系统可观测度是定量的 描述系统的可观测情况,系统可观测度为0时系统不 可观测,可观测度越大则系统的可观测性越好.所以 系统的定位性能与其可观测性及可观测度度有着紧 密的联系,可以通过分析其可观测性及可观测度来分 析系统的性能.主从式 USV 协同定位系统观测量是 主从 USV 间的相对距离,所以观测方程为

$$h(x) = \sqrt{(X - X_{\rm m})^2 + (Y - Y_{\rm m})^2} = \sqrt{x^2 + y^2}.$$
(7)

显然观测方程是一个非线性方程,为了更加准确地分析系统可观测性,本文使用李导数来对其可观测性进行分析.本文在第1节建立的基于协同坐标系的主从式 USV 运动模型基础上分析系统可观测性及可观测度,根据系统可观测性的李导数判定方法,首先将从 USV 在协同坐标系中的状态方程表示成如下连续形式:

 $\dot{\mathbf{x}} = f(\mathbf{x}, \mathbf{u})$.

其中

$$f = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v\cos\gamma \\ v\sin\gamma \end{pmatrix}.$$
 (9)

(8)

观测方程的零阶李导数就是方程本身,可以写作

$$L^{0}h(\mathbf{x}) = \sqrt{x^{2} + y^{2}}.$$
 (10)

水
$$\mu$$
 L $n(\mathbf{x})$ 天 τ USV (八公里的 体 \mathcal{B} , 将

$$\nabla L^0 h(x) = \begin{bmatrix} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} & \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \end{bmatrix}, \quad (11)$$

进而求得一阶李导数的梯度为

$$\nabla L^{1}h = \begin{bmatrix} \frac{v_{1}y^{2} - v_{2}xy}{(\sqrt{x^{2} + y^{2}})^{3}} & \frac{v_{2}x^{2} - v_{1}xy}{(\sqrt{x^{2} + y^{2}})^{3}} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

那么可观测性矩阵可以写作

$$\boldsymbol{O} = \begin{bmatrix} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} & \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \\ \frac{v_1 y^2 - v_2 x y}{\left(\sqrt{x^2 + y^2}\right)^3} & \frac{v_2 x^2 - v_1 x y}{\left(\sqrt{x^2 + y^2}\right)^3} \end{bmatrix}.$$
 (13)

可观测性矩阵的行列式值为

det
$$O = \frac{v_1 y - v_2 x}{x^2 + y^2}$$
. (14)

根据线性代数可知,当矩阵行列式不等于0时, 即只要 $v_1y - v_2x \neq 0$,那么可观测性矩阵满秩,此时 系统完全可观.根据式(14)可知,当 det O = 0时,可 分为以下 3 种情况:1)从 USV 在协同坐标系 Σ_{cL} 中 的原点位置,考虑到坐标系原点固连在主 USV 艇体 重心处,所以在实际运动中不可能出现这种情况. 2)从USV 在协同坐标系 Σ_{cL} 中的速度为 0,这种情 况意味着主从 USV 相对静止,即两者速度大小相

等,方向相同. 3) 更一般的情况,可由式 $\frac{y}{x} = \frac{v_2}{v_1} =$

 $\frac{v\sin\gamma}{v\cos\gamma}$ = tan γ 表示,这种情况表示当前时刻从 USV 的位置和协同坐标系 Σ_{ct} 原点连线与 x 轴间的夹角 等于从 USV 在协同坐标系中的航向角 γ .

通过以上分析可知,当主从式 USV 协同定位系 统满足以上3种情况时,系统不可观,将后两种情况 定义为主从式 USV 协同定位系统的不可观测路径. 除此之外,主从式 USV 协同定位系统都可观. 但是, 系统是否可观只是从定性角度反映了观测量是否具 备解算出系统状态量的能力,并不能描述其性能的 好坏.在实际应用中.仅仅明确系统是否可观往往 是不够的. 对于完全可观的系统, 尚存在可观测程 度的问题,如果系统可观测矩阵性态不好,那么即 使系统完全可观,也有可能造成系统方程的病态性. 另外,考虑到单纯依靠距离观测的协同定位系统观 测信息量有限,往往更关心的是系统可观测性大小 的条件性变化,即系统在何种条件下可观测性强,何 种条件下可观测性弱,只有这样才能够在实际应用 过程中有目的的去设计合理的协同定位方案(包括 队形编排、航路机动以及协同规则等),从而保证协 同定位性能.为进一步考察系统状态量的估计精 度,通过矩阵条件数理论对系统可观测度作进一步 分析.常用的关于 p 范数 || · || 。的条件数标记为 $condA_{2}$,一般称 $condA_{2}$ 为谱条件数. 根据矩阵条件 数理论,条件数小的矩阵称为"良性"矩阵,反之称 为"病态"矩阵.系统可观测性矩阵的条件数越大, 系统的可观测程度越差;如果系统可观测性矩阵的 条件数无穷大,则系统不可观测:反之,系统可观测 矩阵的条件数越接近1,系统的可观测性最好.由于 矩阵条件数是一个≥1的正数,不妨定义可观测度 D为可观测矩阵O条件数的倒数,即

$$D = (\operatorname{cond} O)^{-1}.$$
 (15)

根据以上分析, D 可表示为

$$D = \frac{\min\left(v, \left|\frac{x^2 + y^2}{y\cos\gamma - x\sin\gamma}\right|\right)}{\max\left(v, \left|\frac{x^2 + y^2}{y\cos\gamma - x\sin\gamma}\right|\right)}.$$
 (16)

由上式可知,当 $v = \left| \frac{x^2 + y^2}{y \cos \gamma - x \sin \gamma} \right|$ 时,可观测

度最大为1,此时可以得到

 $x^{2} + y^{2} + vx\sin \gamma - vy\cos \gamma = 0, \qquad (17)$

$$x^{2} + y^{2} - vx\sin \gamma + vy\cos \gamma = 0.$$
(18)

根据平面几何知识可知,式(17)表示的是以 (-v·sin γ/2,v·cos γ/2)为圆心,v/2为半径的 圆,式(21)表示的是以(v·sin γ/2, -v·cos γ/2) 为圆心,v/2为半径的圆,也就是说,当从 USV 在协 同坐标系中的位置在式(17)、(18)表示的两个圆中 任意一个上时,系统可观测度最大为1.

为了更加清晰的观察从艇在协同坐标系中的速 度 v 以及航向角 γ 对系统可观测度的影响,设置两 组仿真,第1组仿真中从艇速度 v 不变,改变从艇航 向角 γ,观察不同航向角下可观测度的分布情况, 仿真结果如图 2、3 所示;第2组仿真中,从艇航向角 γ 不变,改变从艇速度 v,观察不同速度下可观测度 的分布情况,仿真结果如图 4 所示.



Fig.2 Three dimensional graph of observable measure





示. 当从 USV 在协同坐标系中的速度 v = 20 m/s,航 向角 $\gamma = 135°$ 时,可观测度随从 USV 位置变化如图 3 所示. 当从 USV 在协同坐标系中的速度 v = 5 m/s, 航向角 $\gamma = 135°$ 时,可观测度随从 USV 位置变化如 图 4 所示.





上面 3 组图中的 x 轴、y 轴坐标表示从 USV 在协 同坐标系中的坐标, D 轴表示系统可观测度. 可以看 出,系统的控制输入对可观测度有影响,那么针对不 可观测路径或可观测度低的路径,可以通过改变系统 控制输入,使从 USV 在协同坐标系中的位置位于可 观测度高的区域,从而改善系统定位性能,具体调整 方法可根据实际情况和任务需求利用式(19)进行调 整. 举例说明: 当任务需要主从 USV 同时驶向某地 时,各 USV 往往会以大致相同的速度航行. 根据前述 分析可知,这种运动方式对应不可观测路径(2)的情 况,从而导致系统不可观.在这种情况下,可以通过改 变系统控制输入达到改善系统可观性的目的,即选择 主从 USV 中任意一个进行变速运动, 使主从 USV 间 始终存在相对运动,从而使得从 USV 在协同坐标系 中处于较高可观测度的位置,进而可以改善系统定位 性能.针对不可观测路径(3)的情况,由于此时满足 式 tan $\gamma = \gamma/x$ 使得系统不可观测,此时可通过圆形 机动来快速提高系统可观测度,圆形机动轨迹可以 减小速度与位移分量比例的相似程度,也就使得 $\tan \gamma \neq \gamma/x$,从而达到提高系统可观测度,改善系 统定位性能的目的.

通常情况下,USV 的航向根据任务需要确定, 为了使系统可观测度提高,可以在航向不变的情况 下改变速度大小,根据式(16),可以推导出

 $v = (x^2 + y^2) / | y \cos \gamma - x \sin \gamma |.$ (19)

速度越接近式(19),系统的可观测度越大.当 速度满足式(19)时,系统可观测度为1.在USV协 同定位时,由于实际系统的条件限制并不一定能满 足式(19),只能使从USV在协同坐标系中的速度尽 可能接近式(19),来提高系统可观测度.

仿真与实验 3

仿真试验 3.1

为验证本文分析的正确性,首先利用 MATLAB 进行仿真试验,试验主要针对不可观测路径进行仿 真;在此基础上,进行调整系统控制输入使不可观测 路径变为可观测路径的仿真验证.

3.1.1 不可观测路径仿真

当协同定位系统满足 det $O = (v_1 y - v_2 x) / (x^2 + y_2 x)$ v^2)=0时,系统不可观测,对第二节分析中的不可观 测路径(2)和不可观测路径(3)进行仿真.

1) 主从 USV 相对静止.主 USV 初始状态为

(-1,1),航向为0°,速度为2 m/s;从 USV 初始状态为 (20,-20),初始状态估计值为(120,-120),航向为0°, 速度为2 m/s,其余仿真条件相同,此时主从 USV 相对 静止,系统不可观测,仿真结果如图5所示.

图 5(a) 中 3 条曲线分别为主 USV 轨迹,从 USV 真实轨迹以及从 USV 的 EKF 滤波轨迹, 图 5(b) 为从 USV 定位误差, 从图中可以看到定位 误差始终在 40 m 附近,图 5(c)为系统可观测度随 时间变化曲线,从图中可以看出系统可观测度一直 为0. 当主从艇相对静止时,系统不可观测,滤波轨 迹始终与真实轨迹存在较大误差,与前文理论分析 结论一致.



Fig.5 Relative stationary path of cooperative localization system 2) 主从 USV 连线与 x 轴夹角为航向角.主从 USV 连线即从 USV 与协同坐标系原点连线,当主从 USV 连线与协同你坐标系 x 轴夹角为航向角时,根 据前文分析可知此时系统不客观. 主 USV 初始状态

为(-1,1),航向为0°,速度为1 m/s;从 USV 初始状 态为(100,1),初始状态估计值为(200,-99),航向 为0°,速度为2 m/s,其余仿真条件与3.1.(1)节相 同,仿真结果如图6所示.



Fig.6 The path through the origin of the cooperative coordinate system of cooperative localization system 图 6(a) 中 3 条曲线分别为主 USV 轨迹,从 USV 真 实轨迹以及从 USV 的 EKF 滤波轨迹,图 6(b) 为从 USV 定位误差,从图中可以看出始终存在70m左右的定位 误差,图6(c)为系统可观测度,从图中可以看出可观测 度一直为0.从仿真结果可以看出,相对运动轨迹经过 协同坐标系 Σ_{CL} 坐标系原点时,系统不可观测,滤波轨 迹与真实轨迹有很大差距,与前文理论分析结论一致. 3.1.2 不可观测路径调整控制输入后仿真

1) 针对主从 USV 相对静止路径.为了验证改变 控制输入可以提高系统定位性能,前500 s 仿真条 件与 3.1.1 条件相同,此时主从 USV 速度大小相等、 方向相同,即主从艇相对静止,系统不可观:500 s之 后,使从 USV 停止 5 s,运行 5 s,且运行速度设置为 4 m/s,此时主从 USV 始终存在相对运动,系统可观 测,仿真结果如图7所示.

从图 7(c) 可以看出系统观测度在调整控制输 入后有显著提高,在调整前系统观测度为0,即系统 不可观;500 s 后,从 USV 速度开始变化,此时由于 速度的变化使得主从 USV 相对位置发生变化,引起 可观测度上下振荡变化. 从图7(b)也可以看出在速 度调整前系统定位误差较大,在调整速度后定位误 差逐渐收敛,从而验证了本文所提方法的有效性.

2) 针对主从 USV 连线与 x 轴夹角为航向角路 径.主 USV 初始状态为(-1,1),航向为 0°,速度为 2 m/s;从 USV 初始状态为(100,1),初始状态估计 值为(200,-99),速度为 2 m/s,前 200 s 航向为 0°, 此时由于主从 USV 连线与协同坐标系 x 轴夹角与 航向角相同,导致系统不可观测.为改善系统定位 性能,使从艇在 200~210 s 之间航向为 90°,210 s 到 480 s 开始作圆形机动路径,480 s 后航向仍为 0°, 仿 真结果如图 8 所示.

从图 8(c)可以看出系统在调整控制输入后可 观测度有显著的增加,在前 200 s 系统没有调整控 制输入,此时系统的观测度为 0,系统不可观,从 图 8(b)可以看出在速度调整前系统的定位误差很 大;在 200 s 后系统调整控制输入,可以看出调整控 制输入后系统可观测度显著提高,定位误差也逐渐 减小,验证了本文所提方法的有效性.





3.2 USV 水上实验

为进一步验证本文所得出的结论在实际系统中 的有效性,在无锡太湖水域进行了协同定位湖上验 证性试验. 主从 USV 均配备 GPS,从 USV 配备 GPS 是为了给后续数据处理过程中提供位置基准. 试验 过程中以主艇高精度的实时 GPS 位置信息为参考 基准,基于水声通信设备实现主从艇间参考信息的 传递以及相对距离信息的观测,进而实现对从艇航 位推算误差的协同校正. 从艇的航位推算位置是基 于 DVL 提供的绝对速度信息以及磁罗经提供的航 向信息推算得到的. 水声通信设备是实现航行器协 同定位的关键,试验采用水声通信设备构建水声通 信网络,实现主从艇相互间相对距离的测量以及参考 信息的传递. 试验中 GPS 定位精度为 2.5 m(RMS). 测速精度 0.1 m/s,更新频率为 10 Hz,磁罗经方位精 度为 2°, DVL 测速精度为 0.1%. 试验过程中主艇以 5 s固定时间间隔向从艇发送自身带标识符的 GPS

位置信息以及二者间相对距离量测信息,辅助从艇进行导航误差的协同校正.主从 USV 在水上共进行了 40 min 试验,试验中主从 USV 的轨迹如图 9 所示.首先主从 USV 同向航行,前后相距大约 100 m, 主 USV 始终朝着东向航行,从 USV 在前 8 min 左右向东以大于主 USV 的速度航行,从 USV 航行约 8 min后转向,以 90°航向角航行,航行约 2 min 后,与主 USV 同向航行,航速与主艇大致相同,航行约 14 min后,转向朝着主 USV 航行约 4 min,然后再次与主 USV 同向航行直至实验结束,但速度时刻变化.

按照前文分析,前 8 min 主从 USV 连线与协同坐标系 x 轴夹角为从 USV 在协同坐标系中航向角,则系统不可观;从第 8 min 到第 10 min 是可观测路径;从第 10 min 到第 24 min 主从 USV 同向同速航行,主从USV 相对静止,系统不可观;从第 24 min 到第 28 min从 USV 满足可观测条件;28 min 后,由于从 USV 速度时刻变化,使得其始终可观测.从 USV 定位误差及观

测度如图 10 所示,可以看出试验结果与本文分析相符,由于实际系统中的噪声不是仿真实验中的零均值高斯噪声,导致从 USV 在不可观测时误差逐渐增大, 在第8 min到第 10 min 时虽然系统可观测,但是由于 观测性很小,在图 10(b)中只有一个小的尖峰,而且 时间很短,所以此时误差下降不多,在系统可观测时 误差稳定在 10 m 左右,验证了本文分析的正确性.





Fig.10 Positioning Error andObservability of follower USV in water experiment

4 结 论

1)两种不可观测路径:从 USV 在协同坐标系坐标系中速度为零时系统不可观;协同坐标系中主从USV 连线与 x 轴夹角与航向角相同时系统不可观测.

2) 主从式 USV 协同定位系统可观测度可由式(16) 表示. 从 USV 在协同坐标系中速度大小决

定较高可观测度的范围大小,速度越大,高可观测度 范围越大,γ决定不可观测范围方向.

3)在 USV 协同定位时,可以根据下式 $v = (x^2 + y^2)/|y\cos \gamma - x\sin \gamma|$ 来改变 USV 速度,达到提高 系统可观测度、减小定位误差的目的.

参考文献

- [1] YAN Rujian , PANG Shuo , SUN Hanbing.Development and missions of unmanned surface vehicle [J].Journal of Marine Science and Application , 2010,9(1):451-457.
- [2] 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):581-585,593.
 ZHANGLichuan, XU Demin, LIU Mingyong, et al. Cooperative navigation of multiple AUVs using moving long baseline[J]. Robot, 2009,31(6):581-585,593
- [3] 张立川,徐德民,刘明雍,等.基于双水听器的多自主水下航行器 协同导航方法[J].系统工程与电子技术,2011,33(7):1603-1606.
 ZHANGLichuan,XU Demin,LIU Mingyong, et al. Cooperative navigation for multiple autonomous underwater vehicles based on two hydrophones[J].Systems Engineering and Electronics,2011,33(7): 1603-1606.
- [4] CURCIOO J, LEONARD J, VAGANAY J, et al. Experiments in moving baseline navigation using autonomous surface craft [C]// Proceedings of MTS/IEEE OCEANS. Washington DC: IEEE, 2005: 730-735.
- [5] BAHR A.Cooperative localization for autonomous underwater vehicles [R]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2009.
- [6] ZHANG Lichuan, XU Demin, LIU Mingyong, et al. Cooperative navigation and location for multiple UUVs[J]. Journal of Marine Science and Application, 2009, 8 (3):216-221.
- [7] 姚尧,徐德民,张立川,等.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[J].机器人,2011,33(1):161-168. YAO Yao, ZHANG Lichuan, XU Demin, et al. Cooperative localization of multiple UUVs with communication delays—a real-time update method based on path prediction[J].Robot,2011,33(1):161-168.
- [8] 李闻白,刘明雍,李虎雄,等.基于单领航者相对位置测量的多 AUV 协同导航系统定位性能分析[J].自动化学报,2011,37 (6):24-73,76.

LI Wenbai, LIU Mingyong, LI Huxiong, et al. Localization performance analysis of cooperative navigation system for multiple AUVs based on relative position measurements with a single leader[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(6):24-73, 76.

- [9] PAPADOPOULOS G. Underwater vehicle localization using range measurements [D].Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- [10] 房新鹏, 严卫生, 李俊兵.基于距离量测的主从式 AUV 协同定位 系统观测性研究[J].西北工业大学学报, 2012, 30(4):547-552. FANG Xinpeng, YAN Weisheng, LI Junbing, et al. Observability analysis of leader-follower cooperative localization system based on relative position measurements[J].Journal of Northwestern Polytechnical University, 2012, 30(4):547-552.
- [11]马朋,张福斌,徐德民,等基于条件数的多自主水下航行器协同定位系统可观测度分析[J]. 兵工学报,2015,36(1):138-143.
 MA Peng, ZHANG Fubin, XU Demin, et al. Observability Analysis of cooperative localization system for MAUV based on condition number[J].ACTA ARMAMENTARII,2015,01:138-143.
- [12] GADRE A.Observability analysis in navigation systems with an underwater vehicle application [D].Montgomery: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007. (编辑 魏希柱)