

基于距离量测的双领航多 AUV 协同定位队形优化分析

马 朋, 张福斌[†], 徐德民

(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

摘 要: 利用领航与跟随多自主水下航行器(AUV)间相对距离量测信息进行协同定位,可有效提高多 AUV 编队整体定位精度. 针对多 AUV 编队队形对协同定位性能所造成的影响,利用 Fisher 信息矩阵(FIM)行列式的对数构建协同定位性能评价函数,并通过评价函数的最大化实现编队队形的优化. 分析并验证多 AUV 编队含有两个跟随 AUV 及两个以上跟随 AUV 共圆情况下的最优队形,并利用梯度下降算法进行迭代搜索,从而获得两个以上跟随 AUV 不共圆情况下的优化队形. 最后,通过仿真实验结果验证结论的正确性及队形优化算法的有效性.

关键词: 多自主水下航行器; 协同定位; Fisher 信息矩阵; 梯度下降

中图分类号: TP391

文献标志码: A

Optimality analysis for formation of MAUV cooperative localization with two leaders based on range measurements

MA Peng, ZHANG Fu-bin[†], XU De-min

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The cooperative localization technique using relative range measurement information between a leader and a follower AUV can significantly improve the overall localization accuracy of the multiple AUV team. For the influence of the multiple AUV formation geometry on the performance of cooperative localization, the logarithms of determinants of Fisher information matrices(FIM) are used to generate an evaluation criterion for the performance of cooperative localization, which can be maximized to derive the optimal formation geometry. When the multiple AUV team consists of two follower AUVs or more than two concyclic follower AUVs, the optimal formation geometry for cooperative localization is analyzed and verified. A gradient descent algorithm is designed to iteratively seek the optimization formation in the case of more than two non-concyclic follower AUVs. Simulation results show the effectiveness of analytical results and the practicality of the proposed formation optimization algorithm.

Keywords: multiple AUV; cooperative localization; Fisher information matrices; gradient descent

0 引 言

目前,多自主水下航行器(AUV)协同定位已成为多 AUV 协作领域的研究热点之一^[1]. 由于多 AUV 间水声通信带宽限制,水下协同定位系统以领航-跟随式结构为主,其中领航 AUV 均装备高精度导航设备,并利用水声通信 Modems 定时向大量装备低精度传感器的跟随 AUV 分享导航信息,在保证定位精度要求的前提下,有效地降低了系统成本,摆脱了海底基阵或水面导航信标的束缚,扩大了作业任务范围.

在有关多 AUV 协同定位的研究中,大多关注于内部与外部量测信息融合及定位算法的设计^[2-4]. 然而,无论何种融合算法,在一定程度上均受到多 AUV

编队规模、队形拓扑结构的影响与限制. 由于多 AUV 间量测向量结构的变化会引起协同定位系统可观测度的变化,而造成量测向量结构改变的主要因素包括多 AUV 间相对位置关系等,可通过可观测性的分析来间接描述多 AUV 编队队形对协同定位性能的影响. 文献[5]利用基于 Lie 导数的非线性可观测性原理构建了多 AUV 协同定位可观测矩阵,并通过奇异值分解(SVD)以及条件数获得系统可观测性的定量评价函数,继而发现系统可观测度及定位精度会随着多 AUV 编队队形的变化而变化;文献[6]分析认为,在对单领航下的多 AUV 协同定位系统进行线性化后,当领航与跟随 AUV 间相对距离量测方向保持

收稿日期: 2016-12-11; 修回日期: 2017-02-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61273333).

作者简介: 马朋(1987—),男,博士生,从事水下协同导航、惯性导航的研究;张福斌(1972—),男,副教授,博士,从事水下航行器导航、控制技术等研究.

[†]通讯作者. E-mail: zhangfb@nwpu.edu.cn

不变时,协同定位系统将是不可观测的,从而需要领航与跟随AUV间保持相对机动来避开不可观测路径;文献[7]利用双领航AUV交替进行协同导航,从而在多AUV编队队形保持不变的前提下,达到单领航AUV不断机动的效果,增强了系统的可观测性.另一方面,克拉美-罗下限(CRLB)作为Fisher信息矩阵(FIM)的逆,给出了未知参数无偏估计的均方误差理论下限,也可用来定量分析多AUV间的相对位置结构对定位性能的影响.文献[8]针对基于距离量测的多AUV移动长基线定位系统,利用CRLB和FIM建立了与多AUV编队队形结构参数有关的定位性能评价函数,并通过评价函数的极大化来实现定位性能的最优化,分析结果表明,当两个领航AUV与跟随AUV之间的分离角保持90°时,评价函数的行列式达到最大,多AUV编队队形实现最优;文献[9]在文献[8]的基础上进一步探讨了基于距离相关噪声模型下的多AUV最优队形,以及多AUV协同定位性能相对于分离角与噪声因子的敏感性变化;文献[10]研究了移动长基线定位系统中,水面移动浮标和水下目标间的距离与目标定位精度间的关系,获得了定位最优几何结构下的最优距离.此外,CRLB和FIM也被广泛应用于单目标和多目标跟踪定位中的多传感器最优阵列分析^[11-15].

可以发现,以上关于多AUV协同定位编队队形的相关研究大都建立在被定位目标(即跟随AUV)数量为单个的前提上,而所获得的最优定位队形均无法直接应用于包含多个跟随AUV的情况.针对此问题,本文以基于距离量测的多AUV协同定位系统为研究对象,利用FIM的行列式对数构造代价函数,给出含有多个跟随AUV情况下的最优定位队形及相关优化算法,从而实现协同定位性能的进一步提高.

1 多AUV协同定位性能评价准则

为了维持多AUV协同定位过程中的编队队形,并避免单领航下为了提高可观测性而导致的机动

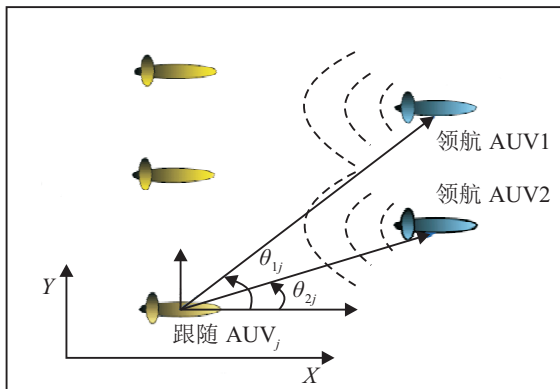


图1 多AUV协同定位系统

现象频繁的情况,选择两个装备高精度导航设备的领航AUV组成移动长基线,跟随AUV利用水声单向测距TOA(time of arrival)获得与领航AUV之间的实时距离,并通过测量领航和跟随AUV深度信息,将三维定位简化为二维平面内的定位问题^[16],如图1所示.

1.1 多AUV协同定位系统模型

定义k时刻跟随AUV_j(j = 1, 2, ..., n)的平面位置状态向量为 $p_{j,k} = [x_{pj,k}, y_{pj,k}]^T$,则跟随AUV_j的运动学简化模型为

$$p_{j,k+1} = f(p_{j,k}, u_{j,k}) = \begin{bmatrix} x_{pj,k} + \delta_t \cdot v_{j,k} \cdot \cos(\varphi_{j,k}) \\ y_{pj,k} + \delta_t \cdot v_{j,k} \cdot \sin(\varphi_{j,k}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中: δ_t 为采样时间;控制输入 $u_{j,k} = [v_{j,k} \quad \varphi_{j,k}]^T$, $v_{j,k}$ 和 $\varphi_{j,k}$ 分别为跟随AUV_j 自带传感器所测得的前向合成速度和航向角,均受高斯白噪声干扰.

定义k时刻领航AUV_j(j = 1, 2)的位置状态向量为 $q_{i,k} = [x_{qi,k}, y_{qi,k}]^T$,则领航与跟随AUV之间的距离量测可表示为

$$Z_{ij,k} = h(q_{i,k}, p_{j,k}) + v_{ij,k} = \|q_{i,k} - p_{j,k}\| + v_{ij,k}, \quad (2)$$

其中

$$d_{ij,k} = \|q_{i,k} - p_{j,k}\| = \sqrt{(x_{qi,k} - x_{pj,k})^2 + (y_{qi,k} - y_{pj,k})^2} \quad (3)$$

为领航与跟随AUV之间的欧氏距离, $v_{ij,k}$ 为距离量测高斯白噪声,其协方差为

$$R_{ij,k} = E(v_{ij,k} v_{ij,k}^T) = \sigma_k^2 = \sigma^2. \quad (4)$$

1.2 定位性能评价函数

假设跟随AUV_j 位置状态 $p_{j,k}$ 的无偏估计为 $\hat{p}_{j,k}$,估计协方差的CRLB作为FIM的逆,提供了状态估计过程中的误差协方差下界,即

$$J_{j,k}^{-1} = \text{CRLB} \leq E[(\hat{p}_{j,k} - p_{j,k})(\hat{p}_{j,k} - p_{j,k})^T]. \quad (5)$$

其中: $J_{j,k}$ 为k时刻跟随AUV_j 的FIM, CRLB值越小意味着FIM_{J_{j,k}} 越大,状态估计性能越好.在利用线性化滤波器EKF等进行状态估计的过程中,非线性系统(1)的FIM_{J_{j,k}} 可表示为如下递推形式^[17]:

$$J_{j,k} = (F_{j,k-1} J_{j,k-1}^{-1} F_{j,k-1}^T)^{-1} + \sum_{i=1}^2 H_{ij,k}^T R_{ij,k}^{-1} H_{ij,k} = (F_{j,k-1} J_{j,k-1}^{-1} F_{j,k-1}^T)^{-1} + J_{zj,k}. \quad (6)$$

其中: $J_{zj,k}$ 为状态估计过程中距离测量所包含的信息量大小, $F_{j,k-1}$ 和 $H_{ij,k}$ 分别为运动学方程(1)和距

离量测方程(2)的雅可比矩阵,即

$$J_{zj,k} = \sum_{i=1}^2 H_{ij,k}^T R_{ij,k}^{-1} H_{ij,k}, \quad (7)$$

$$F_{j,k-1} = \nabla_{\hat{p}_{j,k-1}} f(p_{j,k-1}, u_{j,k}), \quad (8)$$

$$H_{ij,k} = \nabla_{\hat{p}_{j,k/k-1}} h(q_{i,k}, p_{j,k}) = \frac{(\hat{p}_{j,k/k-1} - q_{i,k})^T}{\|q_{i,k} - \hat{p}_{j,k/k-1}\|}. \quad (9)$$

假设跟随AUV位置先验已知,则有 $\hat{p}_{j,k/k-1} = p_{j,k}$,此时雅可比矩阵 $H_{ij,k}$ 可变换为

$$H_{ij,k} = \frac{(p_{j,k} - q_{i,k})^T}{\|q_{i,k} - p_{j,k}\|} = \begin{bmatrix} \frac{x_{p_{j,k}} - x_{q_{i,k}}}{d_{ij,k}}, \frac{y_{p_{j,k}} - y_{q_{i,k}}}{d_{ij,k}} \\ [-\cos \theta_{ij,k}, -\sin \theta_{ij,k}]. \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中: $\theta_{ij,k} \in [0, 2\pi)$ 为第*i*个领航AUV与第*j*个跟随AUV的连线与*X*轴的夹角,如图1所示.从而,将式(4)和(10)代入(7)可得到

$$J_{zj,k} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^2 \begin{bmatrix} \cos^2 \theta_{ij,k} & \cos \theta_{ij,k} \sin \theta_{ij,k} \\ \sin \theta_{ij,k} \cos \theta_{ij,k} & \sin^2 \theta_{ij,k} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

可以发现,在跟随AUV位置已知的情况下,通过领航AUV位置变化而引起多AUV间距离量测结构变化时,只会影响FIM $J_{zj,k}$ 中 $J_{zj,k}$ 项的变化^[8].因此,可使用基于式(11)的实值标量函数来构造多AUV编队队形变化的评价函数.

不同于求FIM的迹、行列式、最大特征值等常用方法,为了便于进行协同定位系统最优队形分析,并简化计算量,选择 $J_{zj,k}$ 的行列式对数来构造评价函数,则单个跟随AUV的定位性能评价函数可以表示如下:

$$S_{j,k} = \log[\det(J_{zj,k})]. \quad (12)$$

因此,在仅有距离量测下的多AUV协同定位过程中,可利用所有 $S_{j,k}$ 的加权求和来构造出多个跟随AUV的整体定位性能评价函数,即

$$S_k^* = \sum_{j=1}^n \mu_j S_{j,k} = \sum_{j=1}^n \mu_j \log[\det(J_{zj,k})]. \quad (13)$$

其中: $\mu_j \in (0, 1]$ 为标量权值参数,且有 $\mu_1 + \mu_2 + \dots + \mu_n = 1$.通过 μ_j 值的选取,可赋予相应跟随AUV不同的定位权重.随着多AUV编队队形的变化, S_k^* 值越大,认为整体定位队形越优.此外,为了简化表达分析,在下文所有表达式及参量中所含时间下标“*k*”将被省略.

2 多AUV协同定位队形优化分析

多AUV协同定位队形优化的过程可看作在跟随AUV位置固定已知情况下,利用领航AUV的位置变化来搜索求取式(13)的 S^* 最大值的过,即

$$\max_{q_i} S^* = \max_{q_i} \sum_{j=1}^n \mu_j S_j = \max_{q_i} \sum_{j=1}^n \mu_j \log[\det(J_{zj})]. \quad (14)$$

将式(11)代入(12),可得

$$\begin{aligned} S_j &= \log \left[\sigma^{-4} \left(\left(\sum_{i=1}^2 \cos^2 \theta_{ij} \right) \left(\sum_{i=1}^2 \sin^2 \theta_{ij} \right) - \left(\sum_{i=1}^2 \cos \theta_{ij} \sin \theta_{ij} \right) \left(\sum_{i=1}^2 \sin \theta_{ij} \cos \theta_{ij} \right) \right) \right] = \\ &= \log \left[\sigma^{-4} \sum_{i_2=1}^2 \sum_{i_1=1}^2 \left((\cos^2 \theta_{i_2 j} \sin^2 \theta_{i_1 j}) - \frac{\sin(2\theta_{i_2 j}) \sin(2\theta_{i_1 j})}{4} \right) \right] = \\ &= \log \left[\frac{\sigma^{-4}}{2} \sum_{i_2=1}^2 \sum_{i_1=1}^2 \sin^2(\theta_{i_2 j} - \theta_{i_1 j}) \right] = \\ &= \log[\sigma^{-4} \sin^2(\theta_{2j} - \theta_{1j})], \end{aligned} \quad (15)$$

若 $n = 1$,则有 $\mu_1 = 1, S^* = S_1$.因此,在只有单个跟随AUV的情况下,若满足 $|\theta_{21} - \theta_{11}| = \pi/2$ 或 $|\theta_{21} - \theta_{11}| = 3\pi/2$,则 S^* 取得最大值 $\log(\sigma^{-4})$,多AUV协同定位队形最优.

此外,通过式(15)可以发现,作为对数函数的真数,有 $\sin(\theta_{2j} - \theta_{1j}) \neq 0$,即跟随AUV与两个领航AUV不能处于同一直线上,即

$$|\theta_{2j} - \theta_{1j}| \neq m\pi, \quad m \in \{0, 1\}. \quad (16)$$

而就可观测性而言,若领航与跟随AUV共线,则基于模型(1)和(2)的多AUV协同定位系统不可观测^[7].

2.1 $n = 2$ 时的协同定位最优队形

当多AUV协同定位系统中含有两个跟随AUV(即 $n = 2$)时,定位性能评价函数(13)可表示为

$$S^* = \sum_{j=1}^2 \mu_j \log[\sigma^{-4} \sin^2(\theta_{2j} - \theta_{1j})]. \quad (17)$$

为了获得最优协同定位队形,先对式(15)进行求导,则有

$$\begin{aligned} \frac{\partial S_j}{\partial \theta_{2j}} &= \frac{2\sigma^{-4} \sin(\theta_{2j} - \theta_{1j}) \cos(\theta_{2j} - \theta_{1j})}{\sigma^{-4} \sin^2(\theta_{2j} - \theta_{1j})} = \\ &= \frac{2 \cos(\theta_{2j} - \theta_{1j})}{\sin(\theta_{2j} - \theta_{1j})}, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\frac{\partial S_j}{\partial \theta_{1j}} = \frac{-2\sigma^{-4} \sin(\theta_{2j} - \theta_{1j}) \cos(\theta_{2j} - \theta_{1j})}{\sigma^{-4} \sin^2(\theta_{2j} - \theta_{1j})} = \frac{-2 \cos(\theta_{2j} - \theta_{1j})}{\sin(\theta_{2j} - \theta_{1j})}. \quad (19)$$

继而对式(17)求导取零,并代入式(18)和(19),可得

$$\frac{\partial S^*}{\partial \theta_{2j}} = \mu_j \frac{\partial S_j}{\partial \theta_{2j}} = \frac{2\mu_j \cos(\theta_{2j} - \theta_{1j})}{\sin(\theta_{2j} - \theta_{1j})} = 0, \quad (20)$$

$$\frac{\partial S^*}{\partial \theta_{1j}} = \mu_j \frac{\partial S_j}{\partial \theta_{1j}} = \frac{-2\mu_j \cos(\theta_{2j} - \theta_{1j})}{\sin(\theta_{2j} - \theta_{1j})} = 0. \quad (21)$$

因此,若跟随AUV位置固定已知,则同时满足以下条件:

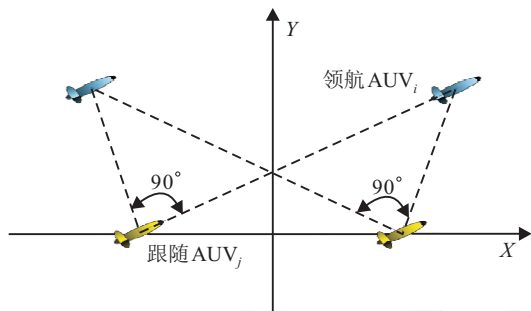
$$\begin{cases} \cos(\theta_{21} - \theta_{11}) = 0, \\ \cos(\theta_{22} - \theta_{12}) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

时,评价函数 S^* 取得最大值,多AUV协同定位队形实现最优.此时领航与跟随AUV之间的相对位置关系可表示为以下两种结构:

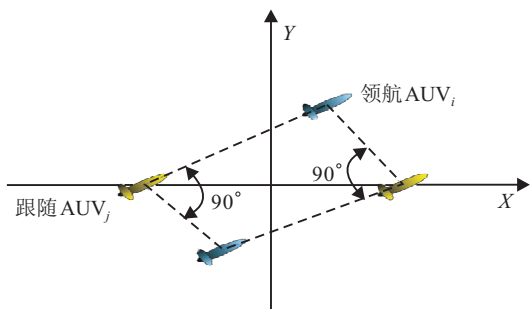
1) $|\theta_{21} - \theta_{11}| = \pi/2$ 且 $|\theta_{22} - \theta_{12}| = \pi/2$;

2) $\begin{cases} |\theta_{21} - \theta_{11}| = \pi/2, & \text{或} \\ |\theta_{22} - \theta_{12}| = 3\pi/2, \end{cases} \begin{cases} |\theta_{21} - \theta_{11}| = 3\pi/2, \\ |\theta_{22} - \theta_{12}| = 3\pi/2. \end{cases}$

如图2所示,两跟随AUV与两领航AUV连线间的夹角均时刻保持 90° ,且不受领航与跟随AUV间距离变化的影响,评价函数 S^* 获得最大值 $\log(\sigma^{-4})$.同时保证了两个跟随AUV的定位性能评价函数 S_j ($j = 1, 2$)均达到最大值 $\log(\sigma^{-4})$,且不受标量权值参数 μ_j 的影响,故图2也可看作是只含单跟随AUV情况下最优队形的对称结合体.



(a) 最优协同定位队形结构I



(b) 最优协同定位队形结构II

图2 $n = 2$ 时最优协同定位队形结构

2.2 $n > 2$ 时的协同定位队形优化

在多AUV协同定位系统中含有3个及多个跟随AUV(即 $n > 2$)的情况下,若所有跟随AUV已知位置处于同一圆周上,则与 $n = 2$ 时的分析方法和结论相类似,当两领航AUV分别位于此圆的任一直径上的两端点时,所有跟随AUV与两领航AUV连线间的夹角形成 90° ,性能评价函数 S^* 与 S_j 均达到最大值 $\log(\sigma^{-4})$,此时多AUV协同定位队形最优,且此最优队形与AUV间距离及标量权值参数 μ_j 无关(实际中,为防止碰撞,应设定AUV间最小允许安全距离).然而,在实际操作过程中,以上假设将很难实现,即无法保证所有跟随AUV处于同一圆周上,所有评价函数 S_j 也就无法同时获得理论最大值.此时多AUV协同定位队形优化作为多目标优化问题,目的在于寻找多个跟随AUV在不同权重值 μ_j 下的定位性能最优平衡解,即Pareto最优解.

根据式(10)的定义,可将领航AUV的位置状态向量表示为

$$q_i = \begin{bmatrix} x_{qi} \\ y_{qi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{pj} + d_{ij} \cos \theta_{ij} \\ y_{pj} + d_{ij} \sin \theta_{ij} \end{bmatrix}, \quad (23)$$

继而表达式(23)两边对 θ_{ij} 进行求导,则有

$$\frac{\partial q_i}{\partial \theta_{ij}} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_{qi}}{\partial \theta_{ij}} \\ \frac{\partial y_{qi}}{\partial \theta_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d_{ij} \sin \theta_{ij} \\ d_{ij} \cos \theta_{ij} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

在式(18)、(19)和(24)的基础上,评价函数式(13)对领航AUV的位置状态向量 q_i 进行一阶求导,即

$$\frac{\partial S^*}{\partial q_i} = \begin{bmatrix} \frac{\partial S^*}{\partial x_{qi}} \\ \frac{\partial S^*}{\partial y_{qi}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n \mu_j \frac{\partial S_j / \partial \theta_{ij}}{\partial x_{qi} / \partial \theta_{ij}} \\ \sum_{j=1}^n \mu_j \frac{\partial S_j / \partial \theta_{ij}}{\partial y_{qi} / \partial \theta_{ij}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n \mu_j M_{ij} G_{ij} \\ \sum_{j=1}^n \mu_j N_{ij} G_{ij} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

其中

$$M_{ij} = \frac{1}{\partial x_{qi} / \partial \theta_{ij}} = \frac{-1}{d_{ij} \sin \theta_{ij}}, \quad (26)$$

$$N_{ij} = \frac{1}{\partial y_{qi} / \partial \theta_{ij}} = \frac{1}{d_{ij} \cos \theta_{ij}}, \quad (27)$$

$$G_{ij} = \partial S_j / \partial \theta_{ij}. \quad (28)$$

从而可利用领航AUV位置状态的变化来构造搜索迭代格式

$$q_i(t+1) = q_i(t) + \lambda(t) \frac{\partial S^*(t)}{\partial q_i(t)}. \quad (29)$$

其中: t 为迭代步数, $\lambda(t)$ 为迭代步长.

将定位性能评价函数(13)重新表示为

$$S^* = \sum_{j=1}^n \mu_j \log \left[\sigma^{-4} \times \left(\left(\sum_{i=1}^2 \left(\frac{x_{pj} - x_{qi}}{d_{ij}} \right)^2 \right) \times \left(\sum_{i=1}^2 \left(\frac{y_{pj} - y_{qi}}{d_{ij}} \right)^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^2 \frac{(x_{pj} - x_{qi})(y_{pj} - y_{qi})}{d_{ij}^2} \right)^2 \right) \right], \quad (30)$$

则利用梯度下降算法求解 S^* 最大值的具体步骤如下:

Step 1: 已知跟随 AUV $_j$ ($j = 1, 2, \dots, n > 2$) 位置 p_j 及其相关标量权值参数 μ_j , 设定领航 AUV $_i$ ($i = 1, 2$) 初始位置 $q_i(0)$, 距离量测误差协方差 σ^2 .

Step 2: 利用式(25)求解梯度 $\partial S^*(t)/\partial q_i(t)$.

Step 3: 利用 Armijo 准则确定迭代步长为 $\lambda(t) = \beta^{\delta(t-1)+1}$, 其中 $0 < \beta < 1, \delta(0) = 1$.

Step 4: 利用式(29)求解 $q_i(t+1)$, 并将其代入式(30)求解 $S^*(t+1)$.

Step 5: 判断性能评价函数 S^* 是否满足条件 $S^*(t) > S^*(t+1)$ 且 $S^*(t) > S^*(t-1)$. 若不满足, 则转 Step 2, 否则继续.

Step 6: 迭代结束, 输出结果, 此时的 $q_i(t)$ 即为最优队形中的领航 AUV 位置.

3 仿真分析

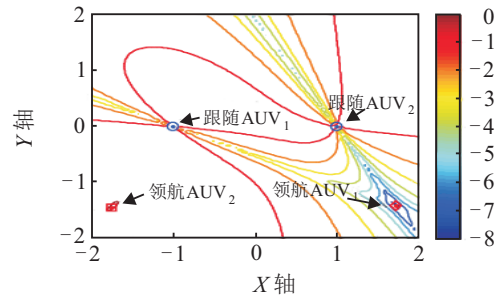
利用 Matlab 对不同多 AUV 编队队形下的协同定位性能进行仿真研究, 并分两种情况讨论分析.

3.1 $n = 2$ 时的协同定位结果

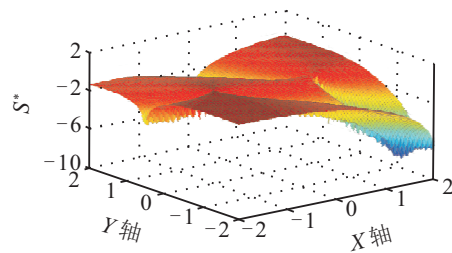
假设多 AUV 协同定位系统中含两个跟随 AUV 和两个领航 AUV, 所有 AUV 处于同一深度平面内. 两跟随 AUV 位置固定坐标分别为 $(-1, 0)$ 和 $(1, 0)$, 标量权值参数分别为 0.4 和 0.6, 领航与跟随 AUV 之间的距离量测误差协方差设定为 $\sigma^2 = 1$. 两领航 AUV 位置坐标分别为: 1) 领航 AUV $_1$ 固定于 $(1.7, -1.4)$ 处, 领航 AUV $_2$ 在 $x_{q2} \in (-2, 2)$ 和 $y_{q2} \in (-2, 2)$ 的区域范围内移动; 2) 领航 AUV $_1$ 固定于 $(0.5, 0.8)$ 处, 领航 AUV $_2$ 在 $x_{q2} \in (-1.5, 1.5)$ 和 $y_{q2} \in (-1.5, 1.5)$ 的区域范围内移动.

如图 3 所示, 当领航 AUV $_2$ (图 3(a) 左下角矩形) 移动至 $(-1.7, -1.35)$ 位置时, 协同定位队形最优. 此时, 将所获得的 AUV 位置坐标分别代入式(10)和(15), 计算可得两领航 AUV 与两跟随 AUV 连线之间的夹角均为 90° , 领航与跟随 AUV 之间相对位置关系

类似于图 2 所示的最优队形结构 I, 而两跟随 AUV 的定位性能为 $S_1 = S_2 = 0$, 整体定位性能也为 $S^* = 0$, 则跟随 AUV 个体与整体定位性能均达到理论最大值 $\log(\sigma^{-4}) = 0$.



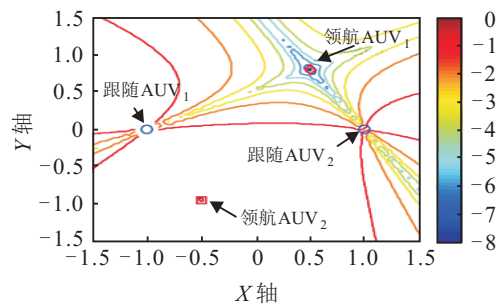
(a) 2-D 队形结构



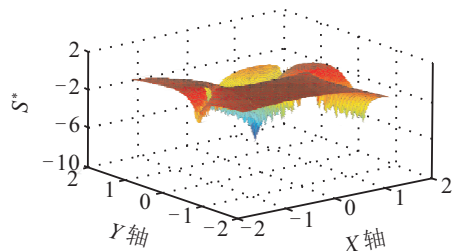
(b) 3-D 队形结构

图 3 最优协同定位队形结构 I

同样地, 在图 4 中, 当领航 AUV $_2$ (图 4(a) 左下角矩形) 位于 $(-0.5, -0.95)$ 时, 领航与跟随 AUV 组成图 2 所示的最优队形结构 II, 两领航 AUV 与跟随 AUV $_1$ (图 4(a) 左圆圈) 连线之间的夹角为 270° , 而与跟随 AUV $_2$ (图 4(a) 右圆圈) 连线之间的夹角则为 90° , 跟随 AUV 个体和整体定位性能也同时达到理论最大值 $\log(\sigma^{-4}) = 0$.



(a) 2-D 队形结构



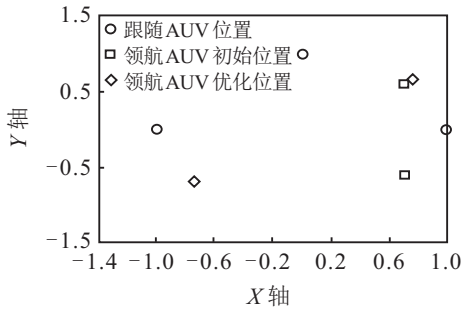
(b) 3-D 队形结构

图 4 最优协同定位队形结构 II

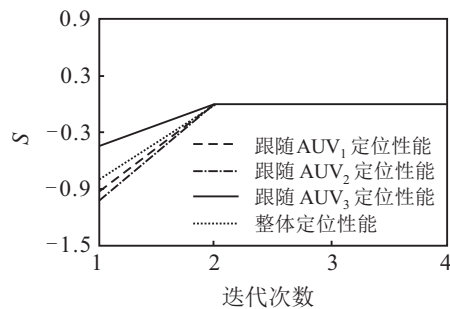
3.2 n > 2时的协同定位结果

假设多AUV协同定位系统中含3个跟随AUV和两个领航AUV,所有AUV处于同一深度平面内,跟随AUV标量权值参数分别为0.3、0.4和0.3,领航与跟随AUV间的距离量测误差协方差设定为 $\sigma^2 = 1$. AUV位置坐标分别为: 1)三跟随AUV共圆,分别固定于(-1, 0)、(0, 1)和(1, 0)处,两领航AUV初始位置分别为(0.7, 0.6)和(0.7, -0.6); 2)三跟随AUV共线排列,分别固定于(-1, 0)、(0, 0)和(1, 0)处,两领航AUV初始位置分别为(0.5, 0.6)和(0.5, -0.6).

在图5中,三跟随AUV固定于圆心为(0, 0)且半径为1的圆周上,当两领航AUV经过4次迭代,从初始位置搜索至(0.75, 0.66)和(-0.74, -0.68)处时(即图5(a)中菱形),跟随AUV个体与整体定位性能均达到理论最大值 $\log(\sigma^{-4}) = 0$. 此时,通过几何作图可证明,两领航AUV与跟随AUV近似位于同一圆周上,且领航AUV间连线为圆的直径,从而领航与跟随AUV组成了理论上的最优队形结构之一.



(a) 协同定位位置

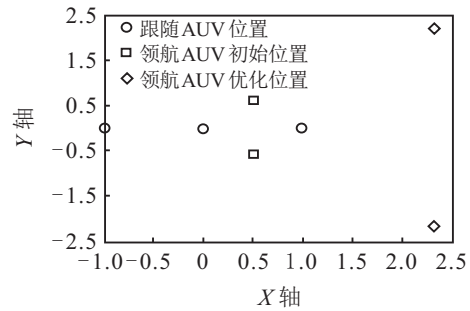


(b) 协同定位性能

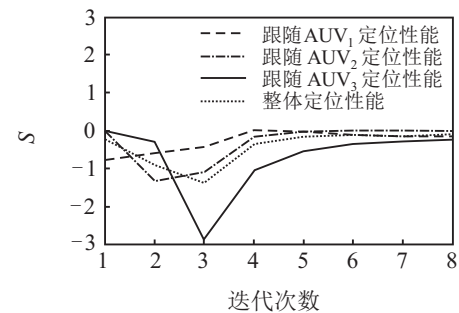
图5 跟随AUV共圆时协同定位队形优化

跟随AUV共线时协同定位队形优化曲线如图6所示. 在图6所示的假设中,三跟随AUV处于同一直线上且不存在外接圆,无法使3个跟随AUV个体定位性能同时达到理论最大值. 在利用梯度下降算法经8次迭代后,两领航AUV从初始位置搜索至(2.32, 2.17)和(2.32, -2.17)时(即如图6(a)中的菱形),三领航AUV定位性能分别变为-0.175、-0.004和-0.236,整体定位性能则变为-0.105. 比较之后可以发现,通过牺牲低权重的跟随AUV₁和AUV₃定位

性能,使得高权重的跟随AUV₂定位性能获得了提高,从而实现整体定位性能的提高和平衡.



(a) 协同定位位置



(b) 协同定位性能

图6 跟随AUV共线时协同定位队形优化

4 结 论

在基于距离量测的多AUV协同定位过程中,编队规模与队形结构将会对定位性能产生重要影响. 本文针对含有多个跟随AUV的协同定位系统,在利用FIM的行列式对数构造定位性能评价函数的基础上,分析并验证了: 1) 含有两个跟随AUV情况下,若两跟随AUV与两领航AUV连线之间的夹角保持90°,则协同定位队形最优且能获得理论最大定位性能值; 2) 含有3个及以上跟随AUV共圆的情况下,若两领航AUV分别位于同一圆直径上两 endpoints,则协同定位队形最优且能获得理论最大定位性能值; 3) 含有3个及以上跟随AUV不共圆的情况下,通过队形优化算法进行迭代搜索,可实现跟随AUV个体定位性能的平衡和整体定位性能的提高.

参考文献(References)

- [1] Paull L, Saeedi S, Seto M, et al. AUV navigation and localization: A review[J]. IEEE J of Oceanic Engineering, 2014, 39(1): 131-149.
- [2] Wang S, Chen L, Gu D, et al. An optimization based moving horizon estimation with application to localization of autonomous underwater vehicles[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2014, 62(10): 1581-1596.
- [3] Bahr A, Walter M R, Leonard J J. Consistent cooperative localization[C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Kobe: IEEE, 2009: 3415-3422.

- [4] 卢健, 徐德民, 张立川, 等. 基于移动长基线和误差修正算法的多UUV协同导航[J]. 控制与决策, 2012, 27(7): 1052-1056.
(Lu J, Xu D M, Zhang L C, et al. Cooperative navigation based on moving long baselines and error correction algorithm for multiple UUVs[J]. Control and Decision, 2012, 27(7): 1052-1056.)
- [5] Arrichiello F, Antonelli G, Aguiar A, et al. An observability metric for underwater vehicle localization using range measurements[J]. Sensors, 2013, 13(12): 16191-16215.
- [6] Fallon M F, Papadopoulos G, Leonard J J, et al. Cooperative AUV navigation using a single maneuvering surface craft[J]. The Int J of Robotics Research, 2010, 29(12): 1461-1474.
- [7] 高伟, 刘亚龙, 徐博, 等. 基于双主交替领航的多AUV协同导航方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(6): 735-740.
(Gao W, Liu Y L, Xu B, et al. Multiple-AUV cooperative navigation based on two-leader alternated navigation[J]. J of Harbin Engineering University, 2014, 35(6): 735-740.)
- [8] 房新鹏, 严卫生. 双领航多自主水下航行器移动长基线定位最优队形研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(8): 1020-1024.
(Fang X P, Yan W S. Formation optimization for cooperative localization based on moving long baseline with two leader AUVs[J]. Acta Armamentar, 2012, 33(8): 1020-1024.)
- [9] Yan W, Fang X, Li J. Formation optimization for AUV localization with range-dependent measurements noise[J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(9): 1579-1582.
- [10] Yan W, Chen W, Cui R, et al. Optimal distance between mobile buoy and target for moving long baseline positioning system[J]. J of Navigation, 2015, 21(10): 1-18.
- [11] Punithakumar K, Kirubarajan T. Multisensor deployment using PCRLBs, incorporating sensor deployment and motion uncertainties[J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic System, 2006, 42(4): 1474-1485.
- [12] Martínez S, Bullo F. Optimal sensor placement and motion coordination for target tracking[J]. Automatica, 2006, 42(4): 661-668.
- [13] Bishop N, Fidan B, Anderson B, et al. Optimality analysis of sensor-target localization geometries[J]. Automatica, 2010, 46(3): 479-492.
- [14] Moreno-Salinas D, Pascoal A M, Aranda J. Optimal sensor placement for multiple underwater target localization with acoustic range measurements[C]. Preprints of the 18th IFAC World Congress. Milano: IFAC, 2011: 12825-12832.
- [15] Tharmarasa R, Kirubarajan T, Hernandez M L. Large-scale optimal sensor array management for multitarget tracking[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Reviews, 2007, 37(5): 803-814.
- [16] Berger C R, Zhou S, Willett P, et al. Stratification effect compensation for improved underwater acoustic ranging[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2008, 56(8): 3779-3783.
- [17] Hernandez M L, Marrs A D, Gordon N J, et al. Cramer-Rao bounds for non-linear filtering with measurement origin uncertainty[C]. Proc of the 5th Int Conf on Information Fusion. Annapolis: IEEE Press, 2002: 18-25.

(责任编辑: 闫妍)

《控制与决策》荣获中国精品科技期刊荣誉称号

本刊讯 2017年10月31日,由国家科学技术部中国科学技术信息研究所主办的“2017年中国科技论文统计结果发布会”在北京国际会议中心举行。会上发布了《2017中国科技论文统计结果》,《控制与决策》在信息科学与系统科学类期刊综合评价指标排名第三,在全国共2008种核心期刊中排名第177位,被评为“第4届中国精品科技期刊”,即“中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)项目来源期刊”。这是本刊第4次获此殊荣,并连续被收录为“中国科技核心期刊”。

同时,会上公布了“2016年中国百篇最具影响国内学术论文”。本年度选取2012年~2016年中国科技论文与引文数据库收录的科技论文,统计全部论文

的累积被引用次数,进入相应发表年度和所属学科领域的前千分之一的论文作为本年度的候选论文,参考多方面评价指标,从中择优选取“中国百篇最具影响国内学术论文”。本刊于2013年第2期发表的由哈尔滨工程大学孙枫等撰写的《Cubature卡尔曼滤波与Unscented卡尔曼滤波估计精度比较》一文获此殊荣。

此外,中国科学技术信息研究所在中国精品科技期刊中遴选优秀学术论文,建设了“领跑者5000——中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)”,集中对外展示和交流我国的优秀学术论文,本刊共有16篇文章入选2017年F5000。