

引用格式: 徐博, 左一兵, 王朝阳, 等. 事件驱动量测-通信联合框架下基于 LMPC 的多 AUV 编队控制方法 [J]. 中国舰船研究, 2026, 21(2): 89-100.

XU B, ZUO Y B, WANG Z Y, et al. Event-driven metrology-communication joint framework based on LMPC multi-AUV formation control[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2026, 21(2): 89-100 (in both Chinese and English).

事件驱动量测-通信联合框架下 基于 LMPC 的多 AUV 编队控制方法



扫码阅读全文

徐博^{1,2}, 左一兵^{*1,2}, 王朝阳^{1,3}, 马雪飞^{1,2}, 朱海峰^{1,2}

1 哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001

2 哈尔滨工程大学 南海研究院, 海南 三亚 572024

3 中原工学院 智能感知与仪器学院, 河南 郑州 451191

摘要: [目的] 针对多自主水下航行器(AUV)编队运动中出现的系统状态感知及传输能力受限及无位置信息交互导致可观性不足的问题, 提出一种用于编队控制的事件驱动量测-通信联合框架下基于 Lyapunov 理论的模型预测控制(ETMCU-LMPC)策略, 以提升编队稳定性与跟踪精度。 [方法] 首先, 融合编队通信拓扑与系统状态, 建立基于状态观测的事件触发机制, 利用各 AUV 之间相对量测信息抑制水声广播失效带来的延迟与丢包, 增强无位置信息交互时的系统可观性; 然后, 设计基于 Lyapunov 理论的分分布式模型预测控制(LMPC)器, 采用反步法构造收缩约束保证递归可行性, 并引入自适应卡尔曼滤波(AKF)补偿量测噪声, 确保闭环稳定性。 [结果] 对 1 艘领航、4 艘跟随共 5 艘 AUV 的编队仿真表明, 与传统 LMPC 相比, ETMCU-LMPC 方法的收敛时间由 8 s 缩短至 6 s, 最大误差由 1.12 m 降至 0.36 m, 稳态误差由 0.57 m 降至 0.06 m, 且控制输入更平稳。 [结论] 所提方法可有效应对通信异常, 提升状态感知与传输受限场景下多 AUV 编队的可靠性, 具有实际工程价值。

关键词: 自主水下航行器; 编队控制; 路径跟踪; 轨迹跟踪; 事件驱动量测-通信联合框架; 模型预测控制; Lyapunov 理论; 自适应卡尔曼滤波

中图分类号: U664.82; TP273

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.04586

0 引言

复杂环境和动态海洋扰动条件下的海洋开发对传统海洋装备的性能提出了严峻挑战。自主水下航行器(AUV)凭借其自主导航、灵活作业和环境适应能力, 已成为深海勘探、环境监测和军事防务等领域的核心装备, 备受国内外各领域学者的广泛关注^[1-3]。尽管单一的 AUV 技术日趋成熟, 但在任务范围、作业效率和系统容错性等方面仍存在显著局限。为此, 受生物集群行为启发, 多 AUV 编队控制技术迅速发展, 通过协同决策^[4]与队形控制, 可显著提升海洋任务的执行效率与鲁棒性。多 AUV 编队控制系统通过协调多个 AUV 的

时空运动与资源分配, 在复杂海洋环境中可实现动态队形保持、协同路径规划和自主避碰等功能^[5]。

迄今, 在多 AUV 编队控制研究中通常采用分布式^[6]与集中式^[6]等编队结构, 相比于传统的滑模控制法^[7]、一致性控制法^[8]、反步法^[9]和人工势场法^[10]等控制方法, 模型预测控制方法(MPC)在处理多输入多输出(MIMO)系统、显式处理多约束等方面具有优势。虽然已经有不少国内外学者利用 MPC 解决了多条件约束、模型不确定性等问题, 但受制于水下复杂的环境影响和编队控制技术方法, 以及水声通信自身受吸收衰减、多径传播、多普勒频移和时变性等不稳定因素的影响, AUV 编队在水下执行任务时编队内部可能出

收稿日期: 2025-07-01 修回日期: 2025-09-11 网络首发时间: 2025-11-12 17:35

基金项目: 微系统技术国防科技重点实验室开放课题(6142804230106)

作者简介: 徐博, 男, 1982 年生, 博士, 教授。研究方向: 惯性导航, 多智能体协同控制, 多传感器智能信息融合。

E-mail: xubocarter@sina.com

左一兵, 男, 2001 年生, 硕士生。研究方向: 多智能体协同控制、量测-通信-控制一体化架构。

E-mail: mraino@hrbeu.edu.cn

王朝阳, 男, 1997 年生, 博士生。研究方向: 复杂约束下编队协同控制。E-mail: wangzhaoyang@hrbeu.edu.cn

*通信作者: 左一兵

现通信中断和通信异常等问题^[11-12]。这些通信问题会影响 AUV 间的信息传递,严重时会影响 AUV 编队的稳定性甚至无法正常工作。

针对水下复杂环境干扰导致的通信延迟问题,Zhou 等^[13]考虑 AUV 编队在通信资源消耗与未知海流干扰的情况,提出一种基于固定时间模糊扰动观测器与事件触发机制(ETM)相结合的控制策略。针对海流和时延复合扰动下无速度信息传输的分布式编队控制问题,苏博等^[14]利用自适应反演滑模设计编队控制器,在此基础上,使用最小二乘法补偿通信对编队控制造成的影响。然而,上述方法针对的时延均为固定时延,而在复杂水下环境中时延通常是随机且无规律的。因此,丁文俊等^[15]对随机通信时延与时变通信拓扑条件下的多 AUV 的轨迹规划进行了研究,在分布式 MPC 控制中引入随机梯度上升法(SGA),提出一种分布式轨迹规划方法。此外,宋逸哲等^[16]针对 AUV 编队在执行任务过程中出现的水声通信资源紧张、通信带宽受限的问题,通过有向图结构及利用编队局部临近单位信息构建了一致性编队跟踪控制协议。闫勋等^[17]针对具有外部干扰、通信中断以及模型参数不确定的多无人艇(无领航艇)编队控制问题,结合非线性耦合通信协议,提出一种动态死区间歇事件触发机制,来提高编队控制器抗通信中断能力。Li 等^[18]针对水声通信条件下 AUV 编队存在的通信时滞问题,提出一种通信一致策略下基于 MPC 的编队控制算法,有效提高了编队内部通信效率。针对拓扑链路中断的问题,徐博等^[19]提出一种可以自适应切换拓扑策略的 MPC 控制方法,通过自适应切换拓扑结构保证编队通信正常。

上述控制算法能够在一定程度上解决因水下环境影响导致无法传递位置信息的编队协同控制问题,但迄今关于多 AUV 编队控制问题主要采用基于水声通信的显示交互模式。该模式通过节点与节点直接传输状态信息实现编队协同,适用于高维状态数据的同步传输,但其自身传输速率低和带宽窄等缺点引发的时延累积和广播冲突难以避免,因此这些补偿措施的效果通常会显著降低^[20]。此外,复杂水下环境和水声通信固有的不稳定性(如吸收衰减、多径效应、多普勒频移、时变性)通常会导致编队 AUV 间通信中断,无法直接交换位置、速度等状态信息。虽然可利用水声测距获取邻节点的相对距离和航向角,但量测信息必然受到噪声污染。因此,考虑利用水声测距等传感器通过信息融合的方式对编队内部状态信息进行观测来避免上述问题。

鉴此,Yan 等^[21]在传感器探测的条件下设计主从式编队协调控制方法,避免了 AUV 编队因依靠水声通信而出现通信延迟和数据丢失的问题。庞师坤等^[22]通过信息融合方式设计导航控制一体化框架,并利用分布式观测器设计 MPC 控制器。AUV 系统存在的通信问题,通常是受到带宽和通信资源限制。现有编队控制研究中一般采用周期性的时间触发采样机制,这一通信方式不仅会造成网络堵塞,还可能导致不必要的数据传输,进一步消耗通信资源。为此,Chen 等^[23]通过在 AUV 编队控制系统中引入事件触发机制,使控制器控制信号仅在事件触发时刻更新,进而显著减少不必要的通信与计算,提高系统的工作效率。Cai 等^[24]提出一种基于事件触发的领航-跟随通信的编队控制方法,以减少多智能体系统编队控制所需的通信资源。因此,采用水声测距与信息融合等方法构建量测-通信联合框架可用来避免上述这些问题。然而,在量测扰动影响下,系统长时间处在通信中断、通信异常和通信丢失等情况下会导致发散问题,故亟待提出一种能够有效降低通信资源的编队控制方法。

综上,针对 AUV 编队在外部环境因素影响下导致无法传递位置信息的编队协同控制问题,本文将提出一种事件驱动量测-通信联合框架(ETMCU)下基于 Lyapunov 理论的模型预测控制(LMPC)策略,称为 ETMCU-LMPC。主要创新点概括如下:

1) 针对多 AUV 编队运动过程中因系统状态感知及传输能力受限而无法进行信息交互的问题,引入一种自适应 ETMCU 框架,使得 AUV 可通过利用此框架在水下量测来获取相邻 AUV 的状态信息。

2) 提出 LMPC 控制方法,即通过设计的反步辅助控制律构造动态收缩约束,将 MPC 滚动时域优化问题的可行解始终约束在稳定的可行域范围内,从而避免传统 MPC 稳定性条件依赖于固定终端约束集易引发局部线性化的问题。

3) 针对所提自适应 ETMCU 框架设计一种基于状态观测的事件触发机制,使得编队在系统状态感知及传输能力受限条件下仅需利用框架量测获取编队状态信息。

1 问题描述

1.1 系统模型与假设

本文考虑多 AUV 编队在固定深度的静水中航行,并满足如下假设:1) 编队内所有 AUV 节点均为关于三轴对称且质量均匀的刚体,忽略其形

变; 2) 在 AUV 航行过程中, 其路径轨迹的一阶、二阶导数存在且连续。图 1 所示为 AUV 在东北天坐标系(惯性系)与载体坐标系下的示意图。

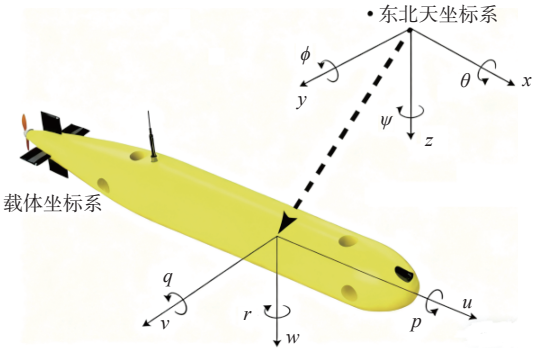


图 1 AUV 运动坐标系

Fig. 1 AUV motion coordinate system

编队中第 i 个三自由度 AUV 运动控制的运动学模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = u_i \cos \psi_i - v_i \sin \psi_i \\ \dot{y}_i = u_i \sin \psi_i + v_i \cos \psi_i \\ \dot{\psi}_i = r_i \end{cases} \quad (1)$$

其矩阵形式为

$$\dot{\boldsymbol{\eta}}_i = \mathbf{R}(\psi_i) \mathbf{v}_i \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\eta}_i = (x_i, y_i, \psi_i)^T$ 为 AUV _{i} 在惯性系下的位置与航向; $\mathbf{v}_i = (u_i, v_i, r_i)^T$ 为载体坐标系下的速度; $\mathbf{R}(\psi_i)$ 为旋转矩阵, 其表达式为

$$\mathbf{R}(\psi_i) = \begin{bmatrix} \cos \psi_i & -\sin \psi_i & 0 \\ \sin \psi_i & \cos \psi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

三自由度 AUV _{i} 运动控制动力学模型为

$$\mathbf{M}_i \dot{\mathbf{v}}_i + \mathbf{C}_i(\mathbf{v}_i) \mathbf{v}_i + \mathbf{D}_i(\mathbf{v}_i) \mathbf{v}_i = \boldsymbol{\tau}_i \quad (4)$$

其中:

$$\mathbf{M}_i = \text{diag}\{m - X_{\dot{u}}, m - Y_{\dot{v}}, I_z - N_r\} \quad (5)$$

$$\mathbf{C}_i(\mathbf{v}_i) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -(m - Y_{\dot{v}})v_i \\ 0 & 0 & (m - X_{\dot{u}})u_i \\ (m - Y_{\dot{v}})v_i & -(m - X_{\dot{u}})u_i & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{D}_i = \text{diag}\{-X_u - X_{u|u}|u|, -Y_v - Y_{v|v}|v|, -N_r - N_{r|r}|r|\} \quad (7)$$

式中: \mathbf{M}_i 为惯性矩阵; m 为 AUV 的质量; $X_{\dot{u}}, Y_{\dot{v}}, N_r$ 为附加惯性系数; I_z 为转动惯量; $\mathbf{C}_i(\mathbf{v}_i)$ 为刚体自身与附加的科里奥利和向心力矩阵; $\mathbf{D}_i(\mathbf{v}_i) = \text{diag}\{d_{11}, d_{22}, d_{33}\}$, 为阻尼矩阵且 $\mathbf{D}_i(\mathbf{v}_i) > 0$; $X_{u|u}, Y_{v|v}$ 与 $N_{r|r}$ 分别为 3 个方向上的非线性阻尼系数; $\boldsymbol{\tau}_i$ 为控制输入。

结合式(2)与式(4)可得到关于 AUV 跟踪问题的动态模型:

$$\dot{\mathbf{x}}_i = \begin{pmatrix} \mathbf{R}(\psi_i) \\ \mathbf{M}_i^{-1}(\boldsymbol{\tau}_i - \mathbf{C}_i(\mathbf{v}_i)\mathbf{v}_i - \mathbf{D}_i(\mathbf{v}_i)\mathbf{v}_i) \end{pmatrix} = f(\mathbf{x}_i, \boldsymbol{\tau}_i) \quad (8)$$

式中: $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i, \psi_i, u_i, v_i, r_i]^T$, 为 AUV 当前的状态变量; $\boldsymbol{\tau}_i = [\tau_{u_i}, \tau_{v_i}, \tau_{r_i}]^T$, 为新的控制变量。

1.2 问题描述与控制目标

对于由 n 个 AUV 组成的编队系统, 其拓扑结构可用无向图 $\mathbf{G} = (\nu, \varepsilon, \mathbf{A})$ 表示。其中, $\nu = \{1, \dots, n\}$ 表示编队的节点集; $\varepsilon = \{(i, j) | i, j = 1, \dots, n; i \neq j\}$ 表示 AUV 编队的边集合; $\mathbf{A} = [a_{ij}]_{n \times n}$ 表示节点 i 与节点 j 之间的连接情况, 其中, $a_{ij} = 1$ 表示 AUV _{i} 与 AUV _{j} 连接, $a_{ij} = 0$ 表示 AUV _{i} 与 AUV _{j} 中断连接; $\mathbf{L} = [l_{ij}]_{n \times n}$ 为无向图 \mathbf{G} 的 Laplace 矩阵, 其中

$$l_{ij} = \begin{cases} \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij}, & i = j \\ -a_{ij}, & i \neq j \end{cases} \quad (9)$$

此外, 对于含领航 AUV 的编队系统, 可定义编队通信拓扑 $\bar{\mathbf{G}} = (\bar{\nu}, \bar{\varepsilon}, \bar{\mathbf{A}})$ 。其中

$$\bar{\nu} = \nu \cup \{0\}$$

$$\bar{\varepsilon} = \{(i, j) | i, j = 0, \dots, n; i \neq j\}$$

$$\bar{\mathbf{A}} = [a_{ij}]_{(n+1) \times (n+1)}$$

若 AUV _{i} 与 AUV _{0} 连接, 则 $a_{i0} > 0$, 否则 $a_{i0} = 0$ 。同时, 定义矩阵 $\mathbf{H} = \mathbf{L} + \mathbf{B}$, $\mathbf{B} = \text{diag}\{a_{01}, a_{02}, \dots, a_{0n}\}$ 。在无向图中, 若任意两点之间均能连接, 则称此通信拓扑为连通图, 且其 Laplace 矩阵特征值满足 $0 = \lambda_1(\mathbf{L}) < \lambda_2(\mathbf{L}) \leq \dots \leq \lambda_N(\mathbf{L})$, 对应特征向量均为 1, 若 AUV _{0} 与 AUV _{i} 至少有一条连接线, 则矩阵 $\mathbf{L} + \mathbf{B}$ 是正定的。本文采用无向图作为 AUV 编队通信拓扑网络结构。

针对分布式 AUV 编队, 基于上述所建 AUV 动态模型和相关假设, 本文将设计基于 ETMCU-LMPC 控制方法(控制策略)的 AUV 编队控制器。该控制器旨在确保 AUV 编队系统能够按照期望的队形跟踪预设轨迹, 并有效应对编队节点之间无法进行位置信息交互带来的潜在影响。以下为控制目标的数学描述:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\boldsymbol{\eta}_1(t) - \boldsymbol{\eta}_0(t)\| = 0 \quad (10)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\boldsymbol{\eta}_i(t) - \bar{\boldsymbol{\eta}}_i(t)\| = 0, i \in N \quad (11)$$

式中: $\boldsymbol{\eta}_1$ 与 $\boldsymbol{\eta}_0$ 表示领航 AUV 及其参考状态信息; $\bar{\boldsymbol{\eta}}_i$ 表示跟随 AUV _{i} 预期状态信息。

2 多 AUV 编队控制算法设计

为解决前文提到的 AUV 编队无法进行水下

信息交互带来的问题,提出采用 ETMCU-LMPC 控制策略获取 AUV 在水下运动过程中的位置信息和速度信息。为减小水下环境噪声对预测的影响,采用自适应卡尔曼滤波(AKF)方法实现对模型状态及噪声参数的实时预测与动态修正;然

后,再设计基于 LMPC 控制方法的 AUV 编队控制器和事件触发机制;最后,在所提控制策略下完成 AUV 编队控制并有效应对 AUV 水下信息交互带来的问题。图 2 所示为本文所提 ETMCU-LMPC 控制策略下的 AUV 编队预测控制框图。

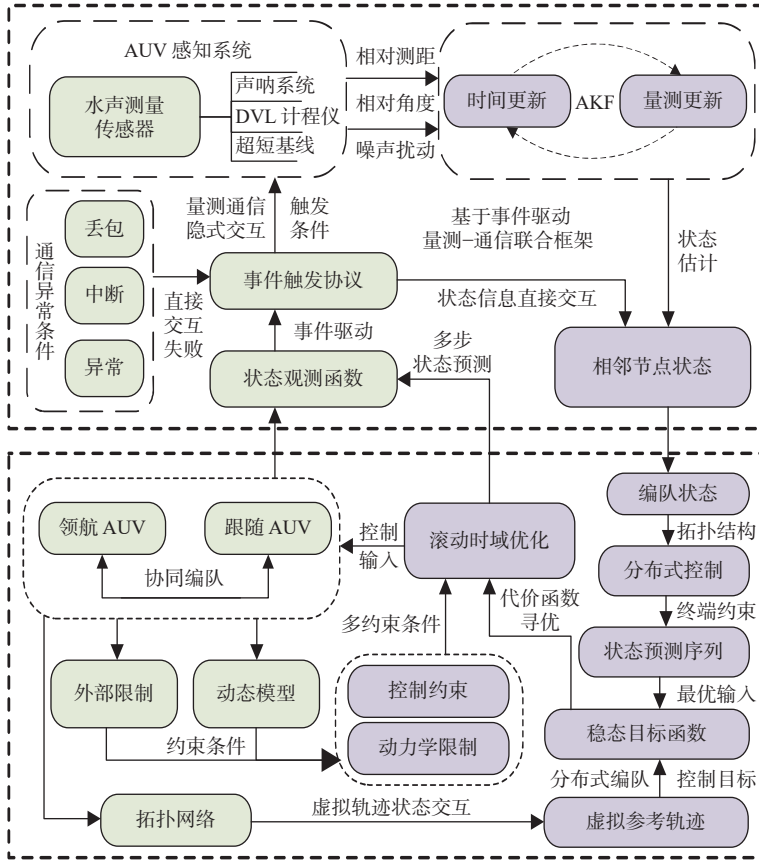


图 2 事件驱动量测-通信联合框架下基于 Lyapunov 理论的模型预测控制策略的 AUV 编队预测控制框图

Fig. 2 Block diagram of ETMCU-LMPC-based AUV formation predictive control

2.1 事件驱动自适应量测-通信联合框架

考虑到 AUV 编队在执行任务过程中不可避免地会因水下复杂环境而导致编队间信息交互出现故障的问题,本文通过提出一种 ETMCU 框架,利用事件触发机制使得 AUV 编队在出现上述问题时,可将通过水声通信获取的信息转变为由 ETMCU 估计得到的 AUV 位置及相对速度信息,从而进行信息的隐式交互。

2.1.1 事件触发量测-通信机制设计

AUV 编队在正常执行任务中,编队各成员之间通常会采用基于水声广播的通信交互方式,即当某节点需要向编队成员共享自身状态时,将通过水声信道发送信号,此时其他节点均可接收该广播信息。然而,水声通信存在传输速率低、带宽窄的固有缺陷,且水声广播信号极易受到水下复杂环境的影响,导致系统之间无法正常进行状态信息交互,进而产生系统通信异常的问题。鉴

此,为了保证 AUV 编队跟踪控制的稳定性,本文在 ETMCU 框架下引入事件触发机制。具体而言,在 AUV 编队内出现通信异常时,即事件触发时刻,控制器可以直接接收量测信息对控制信号进行更新,以避免通信异常时系统无法获得状态信息的问题。

首先,考虑单领航者与多跟随者系统,每个跟随者 AUV 的动态方程可表示为

$$\dot{\eta}_i(t) = \sigma \eta_i(t) + \delta_i(t) \quad (12)$$

式中: σ 为常数,表示跟随 AUV_{*i*} 自身的内在动态特性; $\delta_i(t)$ 表示 AUV_{*i*} 控制输入,由 AUV_{*i*} 相邻节点动态地决定。

通常,系统会沿用前一次事件触发时刻的控制输入在两次事件触发时刻之间做出控制决策,然而这种方法在复杂环境下可能出现因误差过大而导致下一次触发时刻更早到来的情况,使得难以满足系统需求。因此,本文考虑采用基于状态

观测器(SO)的事件触发机制,通过对系统状态变量的观测及估计来提升系统的控制精度。设计状态观测函数为

$$\tilde{\eta}_i = e^{\sigma(t-t_k^i)} \eta_i(t_k^i), t \in [t_k^i, t_{k+1}^i) \quad (13)$$

式中, t_k^i 为跟随 AUV_i 第 k 次事件触发的时刻。

由此设计式(14)所示事件触发一致性协议:

$$\delta_i(t) = K \sum_{j=1}^N a_{ij} (\tilde{\eta}_j(t) - \tilde{\eta}_i(t)) + a_{i0} (\eta_0(t) - \tilde{\eta}_i(t)) \quad (14)$$

式中, K 为预设的控制因子。

假设初始时刻 $\eta_0(t) = \tilde{\eta}_0(t)$, 即 $\tilde{\eta}_0(t)$ 领航 AUV₀ 不存在控制输入。定义观测器的估计误差为

$$\theta_i(t) = \eta_i(t) - \tilde{\eta}_i(t) \quad (15)$$

结合式(13), 可得

$$\theta_i(t) = \eta_i(t) - e^{\sigma(t-t_k^i)} \eta_i(t_k^i), t \in [t_k^i, t_{k+1}^i) \quad (16)$$

且假设跟随 AUV_i 第 k 次事件触发时刻的测量误差 $\theta_i(t_k^i) = 0$ 。进一步地, 其动态方程可表示为

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_i(t) = & K \sum_{j=1}^N a_{ij} (\tilde{\eta}_j(t) - \tilde{\eta}_i(t) + \theta_j(t) - \theta_i(t)) + \\ & a_{i0} (\eta_0(t) - \tilde{\eta}_i(t)) + \sigma \eta_i(t) \end{aligned} \quad (17)$$

定义跟随 AUV_i 与领航 AUV₀ 间的跟踪误差为

$$\mathbf{E}_i(t) = \eta_0(t) - \eta_i(t) \quad (18)$$

再将所有 AUV 的跟踪误差集中后引入矩阵 $\mathbf{H} = \mathbf{KL} + \mathbf{B}$, 便可将由 1 艘领航 AUV₀ 与多艘跟随 AUV_i 组成的系统表示为

$$\dot{\mathbf{E}}(t) = \sigma \mathbf{E}(t) - \mathbf{KL}\theta(t) - \mathbf{HE}(t) \quad (19)$$

其中:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(t) = & [\mathbf{E}_1(t), \mathbf{E}_2(t), \dots, \mathbf{E}_N(t)]^\top \\ \theta(t) = & [\theta_1(t), \theta_2(t), \dots, \theta_N(t)]^\top \end{aligned}$$

因此, 针对本文考虑的由 1 艘领航 AUV₀ 与多艘跟随 AUV_i 组成的系统, 设计 AUV_i 的事件触发函数为

$$t_{k+1}^i = \inf \{ t > t_k^i \mid \chi(\theta(t), \mathbf{E}(t)) > 0 \}, k = 0, 1, 2, \dots \quad (20)$$

$$\chi(\theta(t), \mathbf{E}(t)) = \|\theta(t)\| - \sqrt{\frac{\kappa(1-\kappa K)}{K} \frac{\lambda_{\max}(\mathbf{H})}{\lambda_N}} \|\mathbf{E}(t)\| \quad (21)$$

式中: κ 表示预设的正整数, 且 $1 - \kappa K > 0$; $\lambda_{\max}(\mathbf{H})$ 表示矩阵 \mathbf{H} 的最大特征值。当事件触发函数 $\chi(\theta(t), \mathbf{E}(t)) > 0$ 时, 事件触发, 此时为事件触发时刻 t_k^i 。其后, 由前文定义的 AUV_i 在 t_k^i 时刻的测量

误差为 0, 即 $\theta_i(t_k^i) = 0$ 可知, 在事件触发时刻, $\chi(\theta(t), \mathbf{E}(t)) \leq 0$ 。由此, 在事件触发时刻 t_k^i 后, 事件触发函数将随 $\|\theta(t)\|$ 的波动而波动, 直至 t_{k+1}^i 时刻。

2.1.2 自适应卡尔曼滤波器设计

受限于水下复杂环境的影响, ETMCU 框架在估计过程中不可避免地会受到噪声干扰。因此, 采用 AKF 估计外部噪声扰动, 并实时修正量测信息, 以提高系统的观测精度。首先, 建立 ETMCU 框架下的离散系统数学模型, 即

$$\mathbf{X}_k^i = \Phi_{k,k-1}^i \mathbf{X}_{k-1}^i + \mathbf{w}_{k-1} \quad (22)$$

$$\mathbf{Z}_k^i = \mathbf{H}_k^i \mathbf{X}_k^i + \delta_k \quad (23)$$

式中: \mathbf{X}_k^i 表示 AUV_i 在 t_k 时刻的状态向量; \mathbf{Z}_k^i 表示 AUV_i 在 t_k 时刻的量测向量; \mathbf{w}_{k-1} 和 δ_k 分别表示 t_{k-1} 和 t_k 时刻的系统噪声与量测噪声; $\Phi_{k,k-1}^i$ 和 $\mathbf{H}_k^i = [dl_k^i \ \varphi_k^i]^\top$ 为系统状态转移矩阵及量测函数。其中, AUV_i 在 t_k 时刻的相对距离 dl_k^i 和角度 φ_k^i 分别为

$$dl_k^i = a_{ij} \sqrt{(x_k^i - x_k^j)^2 + (y_k^i - y_k^j)^2} + \delta_{r,k} \quad (24)$$

$$\varphi_k^i = \arctan(y_k^i - y_k^j / x_k^i - x_k^j) + \delta_{\varphi,k} \quad (25)$$

式中, $\delta_{r,k}$ 和 $\delta_{\varphi,k}$ 分别为其中相对距离与角度的量测噪声。统计特性分别为

$$\begin{cases} \mathbf{E}[\mathbf{w}_k] = \mathbf{q}_k, \mathbf{E}[\delta_k] = \mathbf{r}_k, \mathbf{E}[\mathbf{w}_k \delta_k^\top] = 0 \\ \mathbf{E}[\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^\top] = \mathbf{Q}_k \sigma_{k,l}, \mathbf{E}[\delta_k \delta_k^\top] = \mathbf{R}_k \sigma_{k,l} \end{cases} \quad (26)$$

式中: \mathbf{w}_k 和 δ_k 分别为 t_k 时刻的系统噪声和量测噪声; \mathbf{q}_k 和 \mathbf{r}_k 分别表示系统在 t_k 时刻系统噪声和量测噪声的均值; \mathbf{Q}_k 和 \mathbf{R}_k 分别表示 t_k 时刻对应的协方差阵。由此, AKF 滤波器设计为

$$\hat{\mathbf{X}}_k^i = \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}^i + \mathbf{K}_k^i \tilde{\mathbf{Z}}_k^i \quad (27)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}^i = \Phi_{k,k-1}^i \hat{\mathbf{X}}_{k-1}^i + \hat{\mathbf{q}}_k \quad (28)$$

$$\tilde{\mathbf{Z}}_k^i = \mathbf{Z}_k^i - \mathbf{H}_k^i \hat{\mathbf{X}}_{k,k-1}^i - \hat{\mathbf{r}}_k \quad (29)$$

$$\mathbf{K}_k^i = \mathbf{P}_{k,k-1}^i \mathbf{H}_k^{i\top} [\mathbf{H}_k^i \mathbf{P}_{k,k-1}^i \mathbf{H}_k^{i\top} + \hat{\mathbf{R}}_k]^{-1} \quad (30)$$

$$\mathbf{P}_{k,k-1}^i = \Phi_{k,k-1}^i \mathbf{P}_{k-1}^i \Phi_{k,k-1}^{i\top} + \hat{\mathbf{Q}}_{k-1} \quad (31)$$

$$\mathbf{P}_k^i = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k^i \mathbf{H}_k^i] \mathbf{P}_{k,k-1}^i \quad (32)$$

式中: \mathbf{K}_k^i 表示 AUV_i 在 t_k 时刻的 AKF 滤波增益; \mathbf{P}_k^i 表示 AUV_i 在 t_k 时刻的误差协方差矩阵; \mathbf{I} 为单位矩阵。噪声的递推统计特性为

$$\hat{\mathbf{r}}_{k+1} = (1 - d_k) \hat{\mathbf{r}}_k + d_k (\mathbf{Z}_{k+1}^i - \mathbf{H}_{k+1}^i \hat{\mathbf{X}}_{k+1}^i) \quad (33)$$

$$\hat{\mathbf{R}}_{k+1} = (1-d_k)\hat{\mathbf{R}}_k + d_k(\tilde{\mathbf{Z}}_{k+1}^i \tilde{\mathbf{Z}}_{k+1}^{iT} - \mathbf{H}_{k+1,k}^i \mathbf{P}_{k+1,k}^i \mathbf{H}_{k+1,k}^{iT}) \quad (34)$$

$$\hat{\mathbf{q}}_{k+1} = (1-d_k)\hat{\mathbf{q}}_k + d_k(\hat{\mathbf{X}}_{k+1}^i - \Phi_{k+1,k}^i \hat{\mathbf{X}}_k^i) \quad (35)$$

$$\hat{\mathbf{Q}}_{k+1} = (1-d_k)\hat{\mathbf{Q}}_k + d_k(\mathbf{K}_{k+1}^i \tilde{\mathbf{Z}}_{k+1}^i \tilde{\mathbf{Z}}_{k+1}^{iT} \mathbf{K}_{k+1}^{iT} + \mathbf{P}_{k+1}^i - \Phi_{k+1,k}^i \mathbf{P}_{k+1}^i \mathbf{H}_{k+1,k}^{iT}) \quad (36)$$

$$d_k = (1-b)/(1-b^{k+1}), \quad 0 < b < 1 \quad (37)$$

式中, b 为遗忘因子, 通常在 $0.95 \sim 0.99$ 之间取值, 使得自适应参数 d_k 为小值, 以减小每次递推的误差抖动对下一步结果的影响, 进而使递推结果更加合理平滑。通过 ETMCU 框架, 可以补偿在测距和航向角下的复杂噪声, 最终获得当前时刻补偿后的观测状态。由此, AUV 编队可在系统无法进行位置信息交互时, 通过 ETMCU 框架获得当前自身及相邻节点的准确状态信息。

2.2 多 AUV 编队预测控制器

为使 AUV 能更好地构造收缩约束, 以便进行轨迹跟踪, 本文首先定义轨迹误差 $\tilde{\eta}_i$ 与虚拟控制 \mathbf{v}_i , 然后利用其构造 Lyapunov 函数 $V_{i,1}$, 再利用 $V_{i,1}$ 构造 Lyapunov 函数 $V_{i,2}$, 最后采用反步法构造基于误差反馈的辅助控制律 τ_i^* 。

定义位置跟踪误差为

$$\tilde{\eta}_i = \eta_i - \eta_0 \quad (38)$$

定义变量变换如下:

$$\dot{\eta}_s = \dot{\eta}_0 - \dot{\tilde{\eta}}_i \quad (39)$$

$$\lambda_i = \dot{\eta}_i - \dot{\eta}_s = \dot{\tilde{\eta}}_i + \dot{\tilde{\eta}}_i \quad (40)$$

结合 AUV 运动学式(2), 可得

$$\mathbf{v}_s = \mathbf{R}^T(\psi_i) \dot{\eta}_s \quad (41)$$

$$\dot{\eta}_i - \dot{\eta}_0 = \mathbf{R}(\psi_i)(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_0) \quad (42)$$

式中, \mathbf{v}_0 为 AUV₀ 在载体系下的速度。此时, 将 \mathbf{v}_i 视为保持 AUV 稳定跟踪轨迹的虚拟控制器, 可得

$$\mathbf{R}(\psi_i) \mathbf{v}_i = \dot{\eta}_i = \lambda_i + \dot{\eta}_s \quad (43)$$

令 $\alpha_i = \dot{\eta}_s$, 结合式(42)和式(43), 可得

$$\dot{\tilde{\eta}}_i = \lambda_i + \alpha_i - \mathbf{R}(\psi_i) \mathbf{v}_0 = \lambda_i - \dot{\tilde{\eta}}_i \quad (44)$$

选取如下 Lyapunov 函数 $V_{i,1}$:

$$V_{i,1} = \tilde{\eta}_i^T \mathbf{K}_{p_i} \tilde{\eta}_i / 2 \quad (45)$$

其中, \mathbf{K}_{p_i} 为控制增益矩阵且 $\mathbf{K}_{p_i} = \mathbf{K}_{p_i}^T > 0$, 对 V_1 求导, 得

$$\dot{V}_{i,1} = \tilde{\eta}_i^T \mathbf{K}_{p_i} \dot{\tilde{\eta}}_i = \tilde{\eta}_i^T \mathbf{K}_{p_i} \lambda_i - \tilde{\eta}_i^T \mathbf{K}_{p_i} \dot{\tilde{\eta}}_i \quad (46)$$

进一步地, 构造 Lyapunov 函数:

$$V_{i,2} = \lambda_i^T \mathbf{M}_i^*(\psi_i) \lambda_i / 2 + V_{i,1} \quad (47)$$

其中, $\mathbf{M}_i^*(\psi_i) = \mathbf{R}(\psi_i) \mathbf{M}_i \mathbf{R}^T(\psi_i)$, 对 $V_{i,2}$ 求导, 得

$$\dot{V}_{i,2} = \lambda_i^T \mathbf{M}_i^*(\psi_i) \dot{\lambda}_i + \lambda_i^T \dot{\mathbf{M}}_i^*(\psi_i) \lambda_i / 2 + \dot{V}_{i,1} \quad (48)$$

结合 AUV 动力学模型, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,2} = & -\lambda_i^T (\mathbf{C}_i^*(\mathbf{v}_i, \psi_i) + \mathbf{D}_i^*(\mathbf{v}_i, \psi_i)) \lambda_i + \lambda_i^T \mathbf{R}(\psi_i) \cdot \\ & [\boldsymbol{\tau}_i - \mathbf{M}_i \dot{\mathbf{v}}_s - \mathbf{D}_i(\mathbf{v}_i) \mathbf{v}_s - \mathbf{C}_i(\mathbf{v}_i) \mathbf{v}_s] + \\ & \frac{1}{2} \lambda_i^T \dot{\mathbf{M}}_i^*(\psi_i) \lambda_i - \tilde{\eta}_i^T \mathbf{K}_{p_i} \dot{\tilde{\eta}}_i + \lambda_i^T \mathbf{K}_{p_i} \tilde{\eta}_i \end{aligned} \quad (49)$$

其中:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_i^*(\mathbf{v}_i, \psi_i) = & \mathbf{R}(\psi_i) \mathbf{C}_i(\mathbf{v}_i) \mathbf{R}^T(\psi_i) - \\ & \mathbf{R}(\psi_i) \mathbf{M}_i \mathbf{R}^T(\psi_i) \dot{\mathbf{R}}(\psi_i) \mathbf{R}^T(\psi_i) \end{aligned} \quad (50)$$

$$\mathbf{D}_i^*(\mathbf{v}_i, \psi_i) = \mathbf{R}(\psi_i) \mathbf{D}_i(\mathbf{v}_i) \mathbf{R}^T(\psi_i) \quad (51)$$

由上可知, 科里奥利力与向心力矩阵为斜对称矩阵, 并可得

$$\lambda_i^T (\mathbf{M}_i^*(\psi_i) - 2\mathbf{C}_i^*(\mathbf{v}_i, \psi_i)) \lambda_i = 0 \quad (52)$$

基于反步法, 选取如下辅助控制律:

$$\tau_i^*(\mathbf{x}_i) = \mathbf{M}_i \dot{\mathbf{v}}_s + \mathbf{C}_i \mathbf{v}_s + \mathbf{D}_i \mathbf{v}_s - \mathbf{R}^T \mathbf{K}_{p_i} \tilde{\eta}_i - \mathbf{R}^T \mathbf{K}_{d_i} \lambda_i \quad (53)$$

其中, $\mathbf{K}_{d_i} > 0$ 表示另一给定的控制增益矩阵, 则将式(53)代入式(49)予以简化, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{i,2} = & -\lambda_i^T (\mathbf{C}_i^*(\mathbf{v}_i, \psi_i) + \mathbf{D}_i^*(\mathbf{v}_i, \psi_i)) \lambda_i + \\ & \lambda_i^T \mathbf{R}(\psi_i) [\boldsymbol{\tau}_i - \mathbf{M}_i \dot{\mathbf{v}}_s - \mathbf{D}_i(\mathbf{v}_i) \mathbf{v}_s - \mathbf{C}_i(\mathbf{v}_i) \mathbf{v}_s] + \\ & \frac{1}{2} \lambda_i^T \dot{\mathbf{M}}_i^*(\psi_i) \lambda_i - \tilde{\eta}_i^T \mathbf{K}_{p_i} \dot{\tilde{\eta}}_i + \lambda_i^T \mathbf{K}_{p_i} \tilde{\eta}_i = \\ & -\lambda_i^T \left(\mathbf{C}_i^*(\mathbf{v}_i, \psi_i) - \frac{1}{2} \dot{\mathbf{M}}_i^*(\psi_i) + \mathbf{D}_i^*(\mathbf{v}_i, \psi_i) \right) \lambda_i + \\ & \lambda_i^T (\mathbf{K}_{p_i} \tilde{\eta}_i + \mathbf{K}_{d_i} \lambda_i) - \tilde{\eta}_i^T \mathbf{K}_{p_i} \dot{\tilde{\eta}}_i + \lambda_i^T \mathbf{K}_{p_i} \tilde{\eta}_i = \\ & -\lambda_i^T [\mathbf{D}_i^*(\mathbf{v}_i, \psi_i) + \mathbf{K}_{d_i}] \lambda_i - \tilde{\eta}_i^T \mathbf{K}_{p_i} \dot{\tilde{\eta}}_i \end{aligned} \quad (54)$$

结合阻尼矩阵正定可知 $\dot{V}_{i,2} < 0$, 由 Lyapunov 稳定性定理可知, 在辅助控制律(式(53))作用下的系统在平衡点 $[\tilde{\eta}_i, \lambda_i] = [0, 0]$ 是全局渐近稳定的。

此外, 为避免局部线性化并保证 AUV 编队运行中路径跟踪的稳定性, 本文设计基于 Lyapunov 的非线性跟踪控制律, 并在建立 AUV 轨迹跟踪控制的 MPC 公式基础上增加如下收缩约束:

$$\min_{\tilde{\tau} \in S(\delta)} \mathbf{J}_i = \int_0^T (\|\tilde{\mathbf{x}}_i(s|t_k)\|_Q^2 + \|\tilde{\boldsymbol{\tau}}_i(s|t_k)\|_R^2) ds + \|\tilde{\mathbf{x}}_i(t_k + T|t_k)\|_P^2 \quad (55)$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_i(l|t_k) = f(\tilde{\mathbf{x}}_i(l|t_k), \tilde{\boldsymbol{\tau}}_i(l|t_k)), \quad l \in [t_k, t_{k+1}] \quad (56)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_i(0) = \hat{\mathbf{x}}_i(t_0) \quad (57)$$

$$|\hat{\boldsymbol{\tau}}_i(s)| \leq \boldsymbol{\tau}_{\max} \quad (58)$$

$$\frac{\partial V_i}{\partial \mathbf{x}_i} f(\mathbf{x}_i(t_0), \boldsymbol{\tau}_i(t_0)) < \frac{\partial V_i}{\partial \mathbf{x}_i} f(\mathbf{x}_i(t_0), \boldsymbol{\tau}_i^*(\mathbf{x}_i(t_0))) \quad (59)$$

式中: $\hat{\mathbf{x}}_i$ 表示系统预测状态轨迹; $\tilde{\mathbf{x}}_i$ 表示预测误差状态; $\hat{\boldsymbol{\tau}}_i$ 表示系统的预测控制输入; $\tilde{\boldsymbol{\tau}}_i$ 表示预测控制输入误差; $\boldsymbol{\tau}_{\max}$ 为系统实际控制输入上限; $f(\cdot)$ 为前文推导的系统动态模型; $\boldsymbol{\tau}_i^*(\cdot)$ 表示设计的基于 Lyapunov 的非线性辅助控制律; $V_i(\cdot)$ 表示对应的 Lyapunov 函数; $\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{R}$ 为相应的权重矩阵; T 为预测时间范围。同时, 新增收缩约束(式(59))也可以保证 LMPC 控制器具有与辅助控制律相同的稳定性, 使 AUV 编队在运行过程中 LMPC 控制器能够很好地执行跟踪工作。

综上, 基于 ETMCU-LMPC 的 AUV 编队控制算法流程图如图 3 所示。主要步骤描述如下:

- 1) 初始化编队以及算法参数, 设置期望队形并根据领航 AUV₀ 的虚拟轨迹给出编队内跟随 AUV_{*i*} 期望轨迹的状态信息;
- 2) 跟随 AUV 通过水声测距等传感器获取编队相对距离和相对角度量测信息, 并基于 ETMCU 框架获取自身及相邻节点的状态信息;
- 3) 基于辅助控制律和自身期望轨迹状态得到预测区间的状态信息序列;
- 4) 根据 AUV 实际状态与最优状态是否大于阈值, 若小于阈值则返回步骤 2, 若大于则求解优化问题, 并选取最优解序列的第 1 项作为当前时刻的控制输入;
- 5) 编队航行是否结束, 若不结束则返回步骤 2。

2.3 稳定性分析

为证明多 AUV 编队控制系统的闭环稳定性, 需要考虑事件触发机制的可行性和预测控制器的稳定性。首先, 设计事件触发机制后, 需要避免系统出现 Zeno 现象, 即系统在有限时间内无限触发导致控制器无法正常运行。因此, 本文将证明

$$\dot{\varphi}(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{\|\boldsymbol{\theta}(t)\|}{\|\mathbf{E}(t)\|} \right) = \frac{\|\dot{\boldsymbol{\theta}}\|}{\|\mathbf{E}\|} + \frac{\|\boldsymbol{\theta}\| \|\dot{\mathbf{E}}\|}{\|\mathbf{E}\|^2} = \frac{\|\dot{\boldsymbol{\eta}} - \dot{\hat{\boldsymbol{\eta}}}\|}{\|\mathbf{E}\|} + \frac{\|\boldsymbol{\theta}\| \|\sigma \mathbf{E} - \mathbf{KL}\boldsymbol{\theta} - \mathbf{HE}\|}{\|\mathbf{E}\|^2} =$$

$$\frac{\|\mathbf{HE} + \mathbf{KL}\boldsymbol{\theta} + \sigma\boldsymbol{\theta}\|}{\|\mathbf{E}\|} + \frac{\|\boldsymbol{\theta}\| \|\sigma \mathbf{E} - \mathbf{KL}\boldsymbol{\theta} - \mathbf{HE}\|}{\|\mathbf{E}\|^2} = (\|\mathbf{KL} + \sigma \mathbf{I}_N\| + \|\sigma \mathbf{I}_N - \mathbf{H}\|) \frac{\|\boldsymbol{\theta}\|}{\|\mathbf{E}\|} + \|\mathbf{KL}\| \frac{\|\boldsymbol{\theta}\|^2}{\|\mathbf{E}\|^2} + \|\mathbf{H}\| \quad (61)$$

且 $\|\mathbf{H}\| \leq \|\mathbf{KL}\| + \|\mathbf{B}\| = K\lambda_N + 1$, 故 $\sigma \mathbf{I}_N < (\mathbf{KL} + \mathbf{B})/2$, \mathbf{I}_N 为与矩阵 \mathbf{L} 对应阶数的单位矩阵, 可得 $\sigma < (K\lambda_N + 1)/2$, 则式(61)可进一步写为

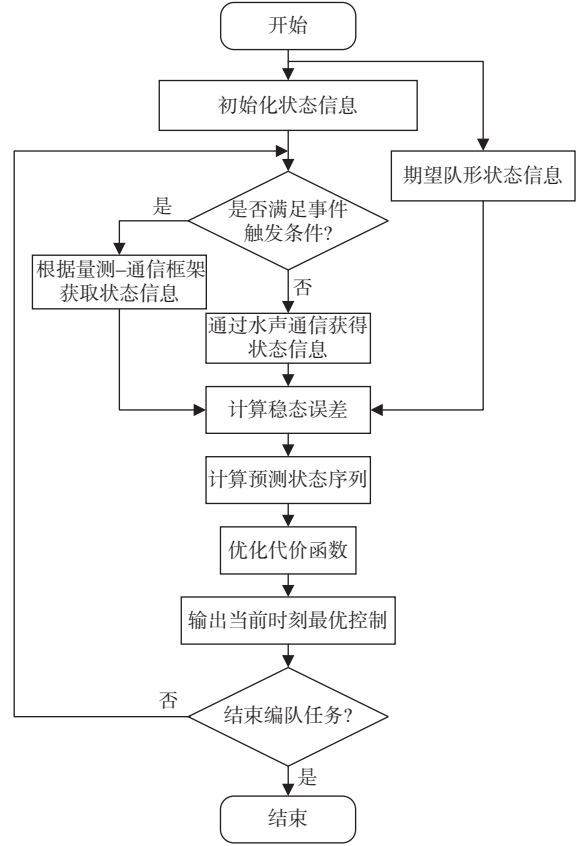


图 3 基于 ETMCU-LMPC 的 AUV 编队控制算法流程图

Fig. 3 Flowchart of ETMCU-LMPC-based AUV formation control algorithm

在两次事件触发的事件间隔存在一个大于 0 的下确界。

定理 1 针对式(36)以及式(37)设计的事件触发机制, 系统不会在有限时间内无限次触发, 即系统不会产生 Zeno 现象。

证明: 为分析触发时间的间隔, 定义如下函数:

$$\varphi(t) = \frac{\|\boldsymbol{\theta}(t)\|}{\|\mathbf{E}(t)\|} \quad (60)$$

因 t_k 时刻 $\boldsymbol{\theta}(t_k) = 0$ 且 $\|\mathbf{E}(t)\| \neq 0$, 结合式(60), 当 $\varphi(t) > \sqrt{\kappa(1-\kappa K)/K} (\lambda_{\max}(\mathbf{H})/\lambda_N) \|\mathbf{E}(t)\|^2$ 时, 其所在时刻为下一次事件触发时刻 t_{k+1} , 其中 $\lambda_{\max}(\mathbf{H})$ 为矩阵 \mathbf{H} 的最大特征值, λ_N 为矩阵 \mathbf{L} 的第 N 个特征值。

对 $\varphi(t)$ 在 $t \in [t_k, t_{k+1})$ 内求导, 可得

$$\dot{\varphi}(t) \leq 1 + K\lambda_N + (1 + 2K\lambda_N) \frac{\|\boldsymbol{\theta}\|}{\|\mathbf{E}\|} + K\lambda_N \frac{\|\boldsymbol{\theta}\|^2}{\|\mathbf{E}\|^2} \leq (1 + K\lambda_N) \left(1 + \frac{\|\boldsymbol{\theta}\|}{\|\mathbf{E}\|} \right)^2 \quad (62)$$

另外,由式(60),可得

$$\dot{\varphi} \leq (1 + K\lambda_N)(1 + \varphi)^2 \quad (63)$$

此时,假设 $\varphi(t)$ 为 $\xi(t)$ 的上界且后者满足

$$\dot{\xi}(t) = (1 + K\lambda_N)(1 + \xi(t))^2 \quad (64)$$

进一步地,可得

$$\xi(t) = \frac{(1 + K\lambda_N)t}{1 - (1 + K\lambda_N)t} \quad (65)$$

令

$$\xi(t) = \sqrt{\frac{\kappa(1 - \kappa K)}{K} \frac{\lambda_{\max}(\mathbf{H})}{\lambda_N}}$$

可得

$$t = \frac{\sqrt{\frac{\kappa(1 - \kappa K)}{K} \frac{\lambda_{\max}(\mathbf{H})}{\lambda_N}}}{\sqrt{\frac{\kappa(1 - \kappa K)}{K} \frac{\lambda_{\max}(\mathbf{H})}{\lambda_N}} ((1 + K\lambda_N))} > 0 \quad (66)$$

$$\begin{aligned} V_{i,3}(l+1) &= \sum_{i=1}^T \left(\left\| \mathbf{x}_i(l+1+i|t) - \mathbf{x}_0(l+1+i|t) \right\|_Q^2 + \left\| \boldsymbol{\tau}_i(l+1+i|t) - \boldsymbol{\tau}_0(l+1+i|t) \right\|_R^2 \right) + \left\| \mathbf{x}_i(l+1+T|t) - \mathbf{x}_0(l+1+T|t) \right\|_P^2 = \\ &= \sum_{i=1}^T \left(\left\| \mathbf{x}_i(l+i|t) - \mathbf{x}_0(l+i|t) \right\|_Q^2 + \left\| \boldsymbol{\tau}_i(l+i|t) - \boldsymbol{\tau}_0(l+i|t) \right\|_R^2 \right) - \left\| \mathbf{x}_i(l+1|t) - \mathbf{x}_0(l+1|t) \right\|_Q^2 - \left\| \boldsymbol{\tau}_i(l+1|t) - \boldsymbol{\tau}_0(l+1|t) \right\|_R^2 + \left\| \mathbf{x}_i(l+1+T|t) - \mathbf{x}_0(l+1+T|t) \right\|_P^2 \leq \\ &= V_{i,3}(l) - \left\| \mathbf{x}_i(l+1|t) - \mathbf{x}_0(l+1|t) \right\|_Q^2 - \left\| \boldsymbol{\tau}_i(l+1|t) - \boldsymbol{\tau}_0(l+1|t) \right\|_R^2 - \left\| \mathbf{x}_i(l+T|t) - \mathbf{x}_0(l+T|t) \right\|_P^2 + \left\| \mathbf{x}_i(l+1+T|t) - \mathbf{x}_0(l+1+T|t) \right\|_P^2 \end{aligned} \quad (68)$$

式中: \mathbf{x}_0 为AUV₀状态信息; $\boldsymbol{\tau}_0$ 为AUV₀的控制输入。由式(59)引入的收缩约束可知,在预测区间内系统状态是稳定的,即在预测时域结束时系统的跟踪误差为0,因此可得到预测区间终端约束为 $\left\| \mathbf{x}_i(l+1|t) - \mathbf{x}_0(l+1|t) \right\|_P^2 = 0$,故 $V_{i,3}(l+1) \leq V_{i,3}(l)$,由此稳定性得证。

3 数值仿真与结果分析

3.1 仿真条件

为验证本文所提ETMCU-LMPC控制策略的有效性,针对AUV编队运行中无法交互位置信息的问题,考虑5艘AUV组成的编队进行对比仿真实验。仿真中,编队成员含1艘领航AUV₀和4艘跟随AUV_i。采用间距三角队形实现跟踪。假设编队所有AUV动力学模型一致且参数如表1所示。

在进行编队控制仿真时,为方便验证,仿真时长设置为60s,采样时间设为0.1s,随机设置占总时长20%~30%的通信中断或异常时间,设定领航AUV₀的期望轨迹为:从原点开始沿x轴正方向,初始时在一定范围内随机生成各AUV_i位置。LMPC控制策略的预测步长为15。模拟5艘AUV编队

此外,因 $\varphi(t)$ 为 $\xi(t)$ 的上界函数,故 $\varphi(t)$ 超过阙值所需时间大于 $\xi(t)$,进而可以得出系统事件触发的时间间隔有明确大于0的下界,即系统不会发生Zeno现象。证毕。

同时,还需要对闭环系统进行稳定性分析,以保证在运行过程中编队误差最终收敛趋近于0。

定理2 针对式(2)和式(4)构成的AUV编队系统,在所设计的控制器(式(55)~式(59))作用下,AUV编队闭环控制系统是渐近稳定的。

证明:为证明本文所提LMPC控制器的稳定性,定义Lyapunov函数 $V_{i,3}$:

$$V_{i,3}(l) = \sum_{i=1}^T \left(\left\| \mathbf{x}_i(l+i|t) - \mathbf{x}_0(l+i|t) \right\|_Q^2 + \left\| \boldsymbol{\tau}_i(l+i|t) - \boldsymbol{\tau}_0(l+i|t) \right\|_R^2 \right) + \left\| \mathbf{x}_i(l+T|t) - \mathbf{x}_0(l+T|t) \right\|_P^2 \quad (67)$$

由二次函数的恒大于等于0的特性可知 $V_{i,3} > 0$,故 $V_{i,3}$ 正定性得证,继而再证明 $V_{i,3}(l+1) \leq V_{i,3}(l)$ 即可。具体如式(68)所示。

在上述条件下完成轨迹跟踪,并绘制编队轨迹图、编队位置状态图和误差曲线。

为说明本文所提方法的有效性,设置以下两种仿真场景进行对比分析。

场景1:在编队AUV无法进行状态信息交互时仍采取传统水声通信获取相邻节点的状态信息,控制器为设计的LMPC。

场景2:在编队AUV无法进行状态信息交互

表1 AUV相关参数

Table 1 Parameters of AUV system

参数	数值
m/kg	180
$X_u/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	-70
$Y_v/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	-100
$N_r/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	-50
$X_{\dot{u}}/\text{kg}$	-30
$Y_{\dot{v}}/\text{kg}$	-80
$N_{\dot{r}}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	-30
$X_{u u }/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-1})$	-200
$N_{v v }/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	-100
$N_{r r }/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	-100

时, 编队采用 ETMCU 框架获取相邻节点的状态信息, 控制器仍选择设计的 LMPC。

通信拓扑如图 4 所示。在场景 1 与场景 2 中均采用相同的参考轨迹, 具体如下:

$$\begin{cases} x = 40 + 30 \cos(-0.08t + \pi) \\ y = 40 \sin(-0.08t + \pi) \end{cases} \quad (69)$$

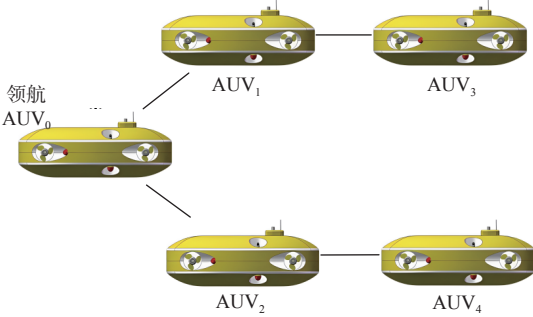


图 4 编队通信拓扑

Fig. 4 Formation communication topology

跟随 AUV_i 与领航 AUV₀ 在 x 轴与 y 轴方向上的期望间距均为 5 m, 初始状态如表 2 所示。

表 2 AUV 编队初始状态

Table 2 Initial state of AUV formation

	$\eta(0)$	$\nu(0)$
AUV ₀	$[10 \ 0 \ 0]^T$	$[0 \ 0 \ 0]^T$
AUV ₁	$[0 \ -10 \ 0.2]^T$	$[0.5 \ 2 \ 0]^T$
AUV ₂	$[15 \ -5 \ -0.2]^T$	$[-2 \ 1 \ 0]^T$
AUV ₃	$[-5 \ 0 \ 0.3]^T$	$[1 \ 0 \ 0]^T$
AUV ₄	$[22 \ -10 \ -0.6]^T$	$[-3 \ -2 \ 0]^T$

在前文设置的条件下对 ETMCU-LMPC 控制策略进行结果对比分析。其中, 图 5 为通信条件图, 图 6 与图 7 分别为两种场景(控制策略)下的 AUV 编队运动轨迹图。图 8~图 9 为两种场景下 AUV 编队在 x, y 方向与航向角的跟踪误差。由图可见, 若单纯采用 LMPC 控制策略, 编队虽然能勉强保持队形跟踪路径, 但编队内 AUV 在

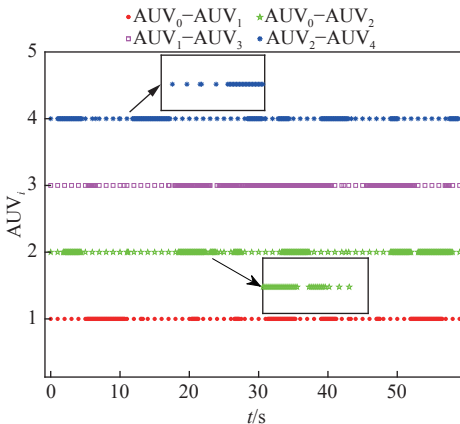


图 5 通信条件示意图

Fig. 5 Schematic diagram of communication conditions

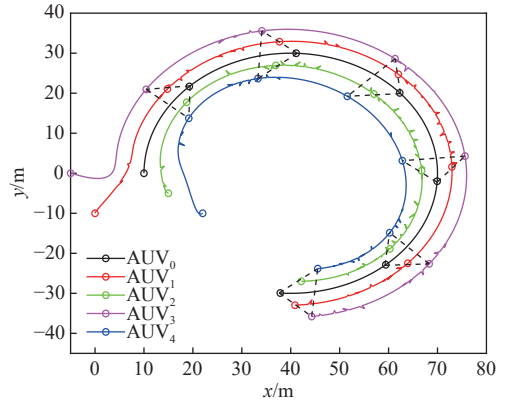


图 6 LMPC 控制策略下 AUV 编队运动轨迹图

Fig. 6 Formation trajectories of AUVs under LMPC

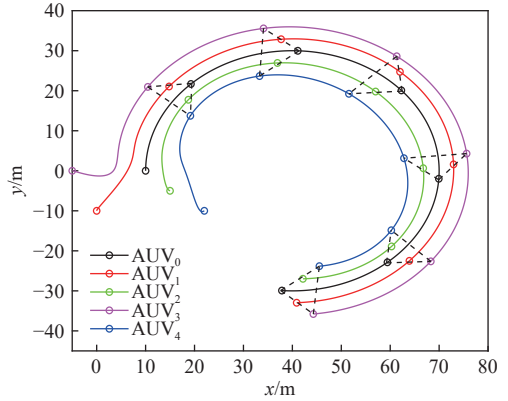


图 7 ETMCU-LMPC 控制策略下 AUV 编队运动轨迹图

Fig. 7 Formation trajectories of AUVs under ETMCU-LMPC

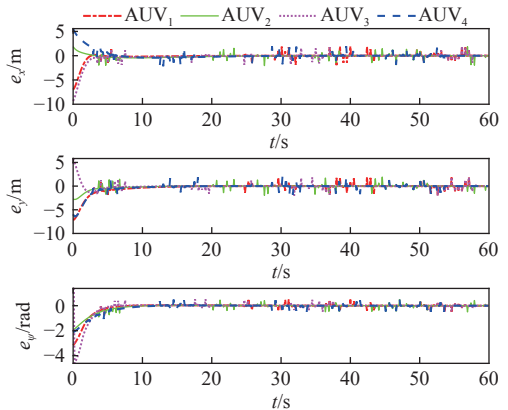


图 8 LMPC 控制策略下 AUV 编队跟踪误差

Fig. 8 Formation tracking errors of AUVs under LMPC

无法进行状态信息交互时编队轨迹出现了较大误差。而 ETMCU-LMPC 控制策略能有效增强 AUV 编队在上述情况下的可靠性与稳定性。

图 10~图 11 为两种场景下在 x 与 y 方向以及航向角的平均跟踪误差与速度误差对比。由图可见, 在 ETMCU-LMPC 控制策略下 AUV 编队可更稳定和快速地跟踪参考轨迹, 具体仿真指标如表 3 所示。图 12 为 ETMCU-LMPC 控制策略下的事件触发时刻图(其中, x 轴为事件触发时刻, y 轴为时间触发时长)。图 13~图 14 为两种场景

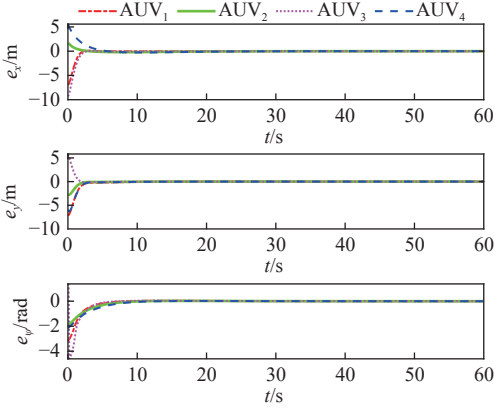


图9 ETMCU-LMPC控制策略下AUV编队跟踪误差

Fig. 9 Formation tracking errors of AUVs under ETMCU-LMPC

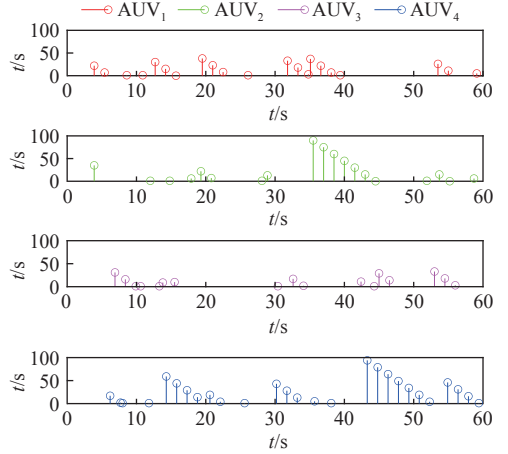


图12 ETMCU-LMPC控制策略下AUV编队事件触发时刻图
Fig. 12 Event-triggered time charts of AUVs under ETMCU-LMPC

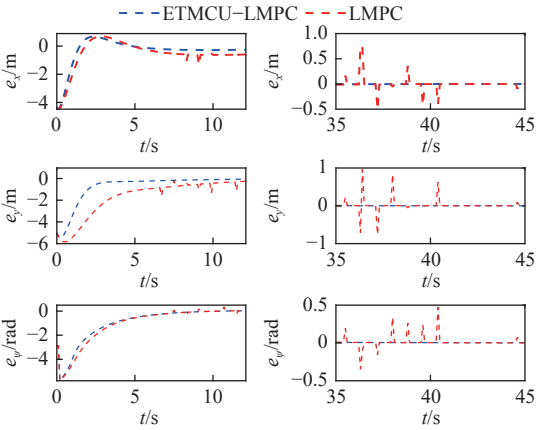


图10 两种控制策略下跟踪误差对比

Fig. 10 Comparison of tracking errors under two control strategies

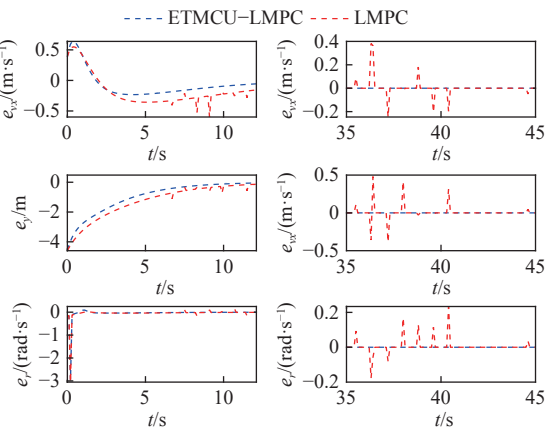


图11 两种控制策略下的速度误差对比

Fig. 11 Comparison of speed errors under two control strategies

表3 AUV编队控制指标

Table 3 AUV formation control indicators

控制策略	收敛时间/s	最大误差/m	稳态误差/m
LMPC	8	1.12	0.57
ETMCU-LMPC	6	0.36	0.06

下的系统控制输入。由图可见,场景2下的控制输入收敛更快更平稳。综合以上的仿真结果,本文所提ETMCU-LMPC控制策略相比于常规控制

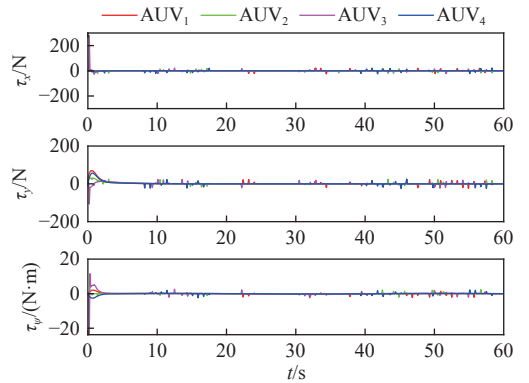


图13 LMPC控制策略下AUV编队控制输入
Fig. 13 Control inputs of AUVs under LMPC

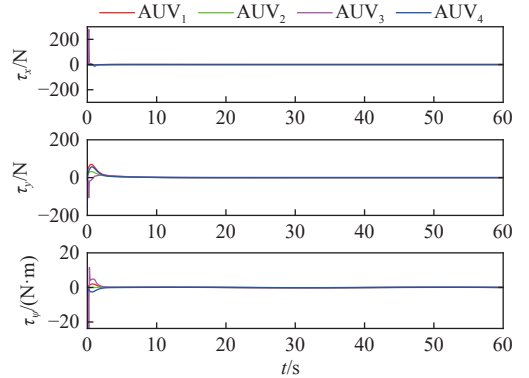


图14 ETMCU-LMPC控制策略下AUV编队控制输入
Fig. 14 Control inputs of AUVs under ETMCU-LMPC

策略在AUV编队内无法进行信息交互的情况下更具有优势。

4 结语

本文旨在研究复杂环境条件下多AUV编队系统信息感知及传输能力受限问题。首先,构建基于分布式理论的多AUV编队模型,提出一种基于ETMCU架构;接着,在此基础上结合通信拓扑网络,建立基于状态观测器的事件触发机制,

即利用 AUV 之间的相对量测信息, 有效避免了水声广播通信受自身及水下复杂环境干扰导致的通信异常问题, 进而提高无位置信息交互情况下系统的稳定性与鲁棒性; 然后, 提出 ETMCU 架构下的一种基于 Lyapunov 理论模型预测分布式编队跟踪控制策略 (ETMCU-LMPC), 并采用反步法控制律构造收缩约束, 确保了上述预测控制策略在迭代过程中的可行性与闭环稳定性。最后, 通过仿真实验证明在 AUV 编队内无法进行状态信息交互时 ETMCU-LMPC 仍可保持良好的控制效果, 从而提高了系统的可靠性。

综上, 目前研究工作仍存在有待进一步完善的空间。例如, 在复杂水下环境下, 传感器数据的获取和处理可能受到延迟的影响, 导致系统在快速变化时无法及时响应。这种延迟可能影响编队的稳定性和控制精度。此外, 在高度不确定性环境下, MPC 方法仍可能出现预测模型的不准确和实时计算能力欠缺的问题。并且, 本文主要探讨了针对通信异常情况下所提 ETMCU 框架与鲁棒 MPC 结合的可行性, 并未对环境噪声的上限及通信异常阈值予以分析。可以预见的是, 长时间的通信异常或中断将使得 ETMCU 的系统发散, 具体阈值受到参数设置和系统精度要求的影响。鉴此, 为解决这些问题, 后续研究将考虑引入扩展状态观测器 (ESO) 或自适应控制技术来增强系统对水下真实环境的适应能力, 并进一步与实际情况相结合开展研究。

参考文献:

- [1] CHEN T H, ZHANG Z, FANG Z, et al. Imitation learning from imperfect demonstrations for AUV path tracking and obstacle avoidance[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 298: 117287.
- [2] LIU L, ZHANG L C, PAN G, et al. Robust yaw control of autonomous underwater vehicle based on fractional-order PID controller[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 257: 111493.
- [3] 宋保维, 潘光, 张立川, 等. 自主水下航行器发展趋势及关键技术 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(5): 27-44.
SONG B W, PAN G, ZHANG L C, et al. Development trend and key technologies of autonomous underwater vehicles[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(5): 27-44 (in Chinese).
- [4] YU C Y, XIANG X B, WILSON P A, et al. Guidance-error-based robust fuzzy adaptive control for bottom following of a flight-style AUV with saturated actuator dynamics[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(5): 1887-1899.
- [5] YANG Y J, WANG Y, MANZIE C, et al. Real-time distributed model predictive control with limited communication data rates[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2025, 70(7): 4928-4935.
- [6] 叶树祥, 丁江明, 刘凤龙. 基于船舶运动学与动力学的级联 MPC 轨迹跟踪控制分析 [J]. *中国舰船研究*, 2025, 20(6): 304-314.
YE S X, DING J M, LIU F L. Research on trajectory tracking control of cascade MPC based on ship kinematics and dynamics[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2025, 20(6): 304-314 (in Chinese).
- [7] BURLUTSKIY N, TOUAHMI Y, LEE B H. Power efficient formation configuration for centralized leader-follower AUVs control[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2012, 17(3): 315-329.
- [8] WU J W, LIU H D, LI B, et al. Precision trajectory control in underwater vehicle-manipulator systems using advanced sliding mode techniques and state estimation [J]. *Ocean Engineering*, 2025, 318: 120129.
- [9] WANG Q D, LIU S N, WEI C L. Distributed adaptive consensus control and disturbance suppression of unknown nonlinear multi-agent systems[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 156956-156965.
- [10] CHEN H X, TANG G Y, WANG S F, et al. Adaptive fixed-time backstepping control for three-dimensional trajectory tracking of underactuated autonomous underwater vehicles[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 275: 114109.
- [11] SALMAN M, KHAN H, LEE M C. Perturbation observer-based obstacle detection and its avoidance using artificial potential field in the unstructured environment [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(2): 943.
- [12] YANG Y, XIAO Y, LI T S. A survey of autonomous underwater vehicle formation: performance, formation control, and communication capability[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2021, 23(2): 815-841.
- [13] ZHOU Z Y, LIU J C, YU J Z. A survey of underwater multi-robot systems[J]. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2022, 9(1): 1-18.
- [14] 苏博, 王洪斌, 高静. 事件触发策略下多 AUV 抗干扰固定时间编队控制 [J]. *控制理论与应用*, 2021, 38(7): 1113-1123.
SU B, WANG H B, GAO J. Anti-disturbance fixed-time formation control of multi-AUVs via event-triggered strategy[J]. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(7): 1113-1123 (in Chinese).
- [15] 丁文俊, 张国宗, 刘海旻, 等. 面向海流扰动和通信时延的欠驱动 AUV 编队跟踪控制 [J]. *兵工学报*, 2024, 45(1): 184-196.
DING W J, ZHANG G Z, LIU H W, et al. Tracking control of underactuated autonomous underwater vehicle formation under current disturbance and communication delay [J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(1): 184-196 (in Chinese).
- [16] 宋逸哲, 刘妹琴, 董山玲, 等. 弱通信条件下多水下自主航行器分布式编队轨迹规划 [J]. *控制与决策*, 2025, 40(1): 71-79.
SONG Y Z, LIU M Q, DONG S L, et al. Distributed formation trajectory planning method for multiple autonomous underwater vehicles with limited communication[J]. *Control and Decision*, 2025, 40(1): 71-79 (in Chinese).
- [17] 闫勋, 廖宇辰, 贾晋军, 等. 面向海洋勘测的多水下机器人编队跟踪控制研究 [J]. *舰船科学技术*, 2024, 46(1):

- 102–108.
YAN X, LIAO Y C, JIA J J, et al. Research on formation-tracking control of Multi-AUV systems for ocean survey [J]. *Ship Science and Technology*, 2024, 46(1): 102–108 (in Chinese).
- [18] LIP, XING X Y, LI Y M, et al. Dynamic deadband intermittent event-triggered strategy for formation control of multiple unmanned surface vehicles[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2025. (2024-09-13)[2025-07-01]. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/10775463241303426>.
- [19] 徐博, 王朝阳, 王潇雨, 等. 通信随机时滞条件下基于分布式模型预测的 AUV 编队控制 [J]. *控制与决策*, 2023, 38(5): 1363–1372.
XU B, WANG Z Y, WANG X Y, et al. AUV formation control with communication stochastic delay based on distributed model prediction[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(5): 1363–1372 (in Chinese).
- [20] XU B, WANG Z Y, SHEN H. Distributed predictive formation control for autonomous underwater vehicles under dynamic switching topology[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 262: 112240.
- [21] YAN Z P, ZHANG C, TIAN W D, et al. Formation trajectory tracking control of discrete-time multi-AUV in A weak communication environment[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 245: 110495.
- [22] 庞师坤, 王健, 易宏, 等. 基于传感探测系统的多自治水下机器人编队协调控制 [J]. *上海交通大学学报*, 2019, 53(5): 549–555.
PANG S K, WANG J, YI H, et al. Formation control of multiple autonomous underwater vehicles based on sensor measuring system[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2019, 53(5): 549–555 (in Chinese).
- [23] CHEN P Y, YAN Q C, ZHAO C B, et al. Path following consistency control based on event-triggered sliding mode control strategy for AUV formation[J/OL]. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2025. (2025-02-16) [2025-07-01]. DOI: 10.1007/s41315-025-00420-y.
- [24] CAI W Y, JU Y K, LIU Z Q, et al. Event-triggered leader-follower communication based formation control with dual-predictor for multiple AUVs[J]. *Ocean Engineering*, 2025, 334: 121552.

Event-driven metrology-communication joint framework based on LMPC multi-AUV formation control

XU Bo^{1,2}, ZUO Yibing^{*1,2}, WANG Zhaoyang^{1,3}, MA Xuefei^{1,2}, ZHU Haifeng^{1,2}

1 College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

2 Nanhai Institute of Harbin Engineering University, Sanya 572024, China

3 School of Intelligent Perception and Instruments, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China

Abstract: [**Objective**] To address the challenges in multi-AUV formation maneuvering, such as limited state perception and transmission capabilities, acoustic communication delays, data loss, and reduced observability due to the lack of position information exchange, this study proposes an event-triggered metrology-communication unified framework with a Lyapunov-based model predictive formation control method (ETMCU-LMPC). The proposed approach aims to enhance formation stability and tracking accuracy.

[**Method**] First, by integrating the formation communication topology with system states, an event-triggered mechanism based on state observation is established. This mechanism leverages relative measurements among AUVs to mitigate delays and data loss caused by acoustic communication failures, while improving system observability in the absence of position information exchange. Second, a distributed model predictive controller based on Lyapunov theory is designed. The controller employs backstepping to construct contractive constraints, ensuring recursive feasibility, and incorporates adaptive Kalman filtering (AKF) to compensate for measurement noise, thereby guaranteeing closed-loop stability. [**Results**] Simulation results of the formation control for five AUVs (1 leader and 4 followers) show that, compared with the traditional LMPC, the proposed ETMCU-LMPC method reduces the convergence time from 8 s to 6 s, the maximum error from 1.12 m to 0.36 m, and the steady-state error from 0.57 m to 0.06 m. Additionally, the control input exhibits greater stability.

[**Conclusion**] The proposed method can effectively cope with communication anomalies, improve the reliability of multi-AUV formations under scenarios with limited state perception and transmission, and thus possesses practical engineering significance.

Key words: autonomous underwater vehicles; formation control; path following; trajectory tracking; event-triggered metrology-communication unified framework; model predictive control; Lyapunov methods; adaptive Kalman filter (AKF)