

控制与决策

Control and Decision

DoS攻击下质量切换无人艇动态记忆事件触动力定位控制

赵颖, 郭世旭, 黄进

引用本文:

赵颖, 郭世旭, 黄进. DoS攻击下质量切换无人艇动态记忆事件触动力定位控制[J]. 控制与决策, 2025, 40(1): 292-299.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2024.0510>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于T-S模糊模型的多时滞非线性网络切换控制系统非脆弱 \$H_\infty\$ 控制](#)

Non-fragile H_∞ control for multi-delay nonlinear network switching control system based on T-S model

控制与决策. 2021, 36(5): 1087-1094 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1098>

[基于周期动态事件触发的网络化切换系统的分析与控制](#)

The analysis and control for networked switched systems based on periodic event-trigger

控制与决策. 2021, 36(10): 2467-2474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0281>

[有向切换拓扑条件下多航天器分组姿态协同控制](#)

Group attitude coordinated control of multi-spacecraft with directed switching topologies

控制与决策. 2021, 36(10): 2389-2398 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0311>

[事件触发机制下分布时滞网络化控制系统 \$H_\infty\$ 故障检测](#)

Event-triggered H_∞ fault detection for networked control systems with distributed delays

控制与决策. 2020, 35(12): 3059-3065 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0456>

[自适应事件触发的马尔科夫跳变多智能体系统一致性](#)

Adaptive event-triggered consensus for Markovian jumping multi-agent systems

控制与决策. 2020, 35(11): 2780-2786 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1507>

DoS攻击下质量切换无人艇动态记忆事件 触动力定位控制

赵颖[†], 郭世旭, 黄进

(大连海事大学 船舶电气工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 研究非线性质量切换无人艇在拒绝服务攻击下的动态记忆事件触动力定位控制问题. 首先, 建立一个切换模糊模型描述非线性质量切换无人艇系统, 该模型同时考虑了船舶的非线性特征及质量变化行为; 然后, 提出一个包含记忆项的动态记忆事件触发机制, 该机制可利用动态变量的历史信息调整触发阈值, 进一步节约有限的通信资源, 在此基础上, 构造基于该动态记忆事件触发机制的控制器以补偿海洋扰动; 接着, 利用多Lyapunov函数策略给出拒绝服务攻击下质量切换无人艇系统动态记忆事件触动力定位控制问题的可解性判据, 在拒绝服务攻击下, 所提出控制方案能够应对网络攻击导致的通信中断问题, 确保质量切换无人艇在恶劣网络条件下仍能保持动力定位性能; 最后, 以一艘质量切换船为例, 验证了该控制方案的合理性.

关键词: 动力定位; 非线性; 无人艇; 拒绝服务攻击; 质量切换; 记忆事件触发

中图分类号: U664.82

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0510

引用格式: 赵颖, 郭世旭, 黄进. DoS攻击下质量切换无人艇动态记忆事件触动力定位控制[J]. 控制与决策, 2025, 40(1): 292-299.

Dynamic memory event-triggered dynamic positioning for mass-switched unmanned marine vehicles under DoS attacks

ZHAO Ying[†], GUO Shi-xu, HUANG Jin

(College of Marine Electrical Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: This paper addresses the dynamic memory event-triggered dynamic positioning control issue of a nonlinear mass-switched unmanned marine vehicle under denial-of-service attacks. Initially, a switched fuzzy model is designed to describe the nonlinear mass-switched unmanned marine vehicle. Both the nonlinear characteristics of the vessel and mass-switched behavior are considered in this model. Then, a dynamic event-triggered mechanism with a memory element is proposed. The historical information of dynamic variables is used to adjust the triggering threshold, further conserving limited communication resources. Based on this mechanism, a controller is designed to compensate for ocean disturbances. Furthermore, by employing the multiple Lyapunov function approach, a solvable criteria for the dynamic memory event-triggered dynamic positioning control issue of a mass-switched unmanned marine vehicle system under denial-of-service attacks is provided. Under denial-of-service attacks, the proposed control scheme can handle communication interruptions caused by network attacks, ensuring that the mass-switched unmanned marine vehicle maintains dynamic positioning performance under adverse network conditions. Finally, the effectiveness of this control scheme is validated by a case study involving a mass-switched vessel.

Keywords: dynamic positioning; nonlinear; unmanned marine vehicle; DoS attacks; mass-switched; memory event-triggered

0 引言

近年来,随着海上油气开发需求不断提高,动力定位控制技术受到了越来越多的关注^[1]. 动力定位技术是指船舶通过合理分配自身推进装置的推力来抵

御外界的海洋环境干扰,从而使船舶保持在某一固定位置或预先确定的轨迹^[2]. 无人艇(unmanned marine vehicles, UUVs)是执行海上作业任务的重要工具,与载人船舶相比,无人艇通常具有体积小、隐蔽性好、机

收稿日期: 2024-04-29; 录用日期: 2024-07-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(62373072); 中央高校基本科研业务费青年教师科技创新项目(3132024109).

责任编辑: 闫敬.

[†]通讯作者. E-mail: yingz@dlnu.edu.cn.

动性高、成本低等优点^[3].

在实际海洋工程中,船舶在航行或停泊过程中往往会受到一些特征变化的影响^[4].例如,当海上船舶执行打捞沉船、调度和回收自主水下探测器、装卸货物、救助溺水人员或部署水雷等任务时,其质量可能会发生很大变化^[5].因此,船舶切换是一个越来越受关注的重要特征.然而,无人艇质量切换这一特点经常被忽略,这不仅会降低其动力定位精确性,而且会增加海上作业难度.因此,有必要深入研究切换系统方法,并应用于质量切换UMV系统中^[6].另一方面,对于UMV的动力定位控制,往往需要传感器采集位置信息,并通过无线网络将其发送到远程控制中心^[7].由于海上恶劣环境和极端天气的频繁发生,通信网络的建设和维护成本非常高.因此,为了充分利用通信网络资源,如何在有限的网络带宽下减少无人艇系统与控制中心之间的动态交互数据传输量是一个值得关注的问题^[8].事件触发机制在节省通信资源和减少冗余数据方面具有巨大的优势,通过预定义事件,只有当事件发生时,才需要传输采样数据^[9-12].最近,学者们提出了一种记忆事件触发新机制:文献[13]介绍了一种静态记忆事件触发机制,实现了多智能体系统通信传输资源节约;文献[14]设计了动态记忆事件触发(dynamic memory event-triggered, DMET)机制,实现了模糊系统的通信传输资源节约.

随着互联网、计算机和通信技术的快速发展,网络安全风险也日益增加.通信网络在给用户提供便利的同时,因其共享性和开放性带来的信息泄露和网络安全威胁也越来越严重.近年来,全球范围内的恶意网络攻击愈演愈烈,引起了众多学者的关注,特别是在UMV系统安全控制领域,对拒绝服务(denial of service, DoS)攻击下的系统性能分析已有大量研究^[15-18].例如:文献[17]提出一种攻击模式相关的滑模控制技术,解决了DoS攻击下UMV系统的安全控制问题;文献[18]研究了具有通信约束和DoS攻击的UMV系统的安全定位控制问题.然而,现有非线性UMV系统网络控制的文献忽略了UMV质量切换特性,因此,研究DoS攻击下质量切换UMV的动力定位控制问题具有重要意义.

在上述讨论的启发下,本文针对DoS攻击下非线性质量切换UMV的动态记忆事件触动力定位控制问题进行研究.首先,利用T-S模糊方法构造UMV模型,与一般的质量切换船模型^[4-5]不同,该模型同时考虑质量切换和船体非线性特征;其次,建立动态记忆事件触发机制和DoS攻击模型,与非切换事件触发

协议^[6,9]相比,动态记忆事件触发协议与UMV切换同步,更符合切换系统的设计需求,此外,动态记忆事件触发比普通的动态事件触发协议的触发间隔更长;再次,利用多Lyapunov函数策略实现DoS攻击下非线性质量切换UMV的动态记忆事件触动力定位控制;最后,通过一艘质量切换船的例子验证所提出控制方案的有效性.

1 问题表述

1.1 非线性质量切换无人艇建模

考虑一个涉及纵荡、横荡和艏摇的三自由度非线性UMV模型

$$\begin{cases} \dot{\alpha}(t) = \mathcal{U}(\varrho(t))\vartheta(t), \\ \mathcal{M}\dot{\vartheta}(t) + \mathcal{D}\vartheta(t) = \mathcal{F}u(t) + \varpi(t). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\alpha(t) = [x(t), y(t), \varrho(t)]^T$ 为无人艇在地球坐标系下的纵荡位置、横荡位置和艏向角, $\vartheta(t) = [\beta(t), v(t), \psi(t)]^T$ 为船体坐标系下的纵荡速度、横荡速度和艏摇角速度, $u(t) = [u_1(t), u_2(t), u_3(t)]^T$ 为控制输入, $\varpi(t) = [\varpi_1(t), \varpi_2(t), \varpi_3(t)]^T$ 为环境干扰且 $\varpi(t) \in L_2[0, \infty)$,坐标转换矩阵 $\mathcal{U}(\varrho(t))$ 形式为

$$\mathcal{U}(\varrho(t)) = \begin{bmatrix} \cos(\varrho(t)) & -\sin(\varrho(t)) & 0 \\ \sin(\varrho(t)) & \cos(\varrho(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$\mathcal{M} \in R^{3 \times 3}$ 为与质量相关的惯性矩阵, $\mathcal{D} \in R^{3 \times 3}$ 为阻尼矩阵.令 $\varsigma(t) = [\alpha^T(t) \ \vartheta^T(t)]^T$,可以得到

$$\dot{\varsigma}(t) = \mathcal{A}\varsigma(t) + \mathcal{B}u(t) + \mathcal{E}\varpi(t). \quad (3)$$

其中

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} 0 & \mathcal{U}(\varrho(t)) \\ 0 & -\mathcal{M}^{-1}\mathcal{D} \end{bmatrix},$$

$$\mathcal{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathcal{M}^{-1}\mathcal{F} \end{bmatrix}, \quad \mathcal{E} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathcal{M}^{-1} \end{bmatrix}.$$

假设船舶具有 q 种不同的质量切换行为,即 $\{\mathcal{M}_1, \mathcal{D}_1, \mathcal{F}_1\}, \{\mathcal{M}_2, \mathcal{D}_2, \mathcal{F}_2\}, \dots, \{\mathcal{M}_q, \mathcal{D}_q, \mathcal{F}_q\}$,那么质量切换UMV模型可以表示如下:

$$\dot{\varsigma}(t) = \mathcal{A}_{\partial(t)}\varsigma(t) + \mathcal{B}_{\partial(t)}u(t) + \mathcal{E}_{\partial(t)}\varpi(t), \quad (4)$$

其中 $\partial(t)$ 为分段常数函数,表征质量切换信号,代表质量何时以及如何切换.当 $\partial(t) = i, i \in Q = \{1, 2, \dots, q\}$ 时,UMV处于第 i 个模式.

由于系统(4)存在非线性分量 $\mathcal{U}(\varrho(t))$,利用如下IF-THEN规则描述该系统.令 $\varrho(t) \in [-\pi/6, \pi/6]$,且定义前提变量 $\bar{h}_1(t) = \sin \varrho(t), \bar{h}_2(t) = \cos \varrho(t)$.

模糊规则 n :

if $\bar{h}_1(t)$ is \mathcal{T}_{n1} and $\bar{h}_2(t)$ is \mathcal{T}_{n2} , then

$$\begin{cases} \dot{\zeta}(t) = \mathcal{A}_{\partial(t)}^n \zeta(t) + \mathcal{B}_{\partial(t)}^n u(t) + \mathcal{E}_{\partial(t)}^n \varpi(t), \\ z(t) = C_{\partial(t)}^n \zeta(t). \end{cases} \quad (5)$$

其中: \mathcal{T}_{n1} 、 \mathcal{T}_{n2} 为模糊集; n 为模糊规则数; $z(t)$ 为控制输出; $C_i^n (i \in Q)$ 为在质量切换信号 $\partial(t) = i$ 下满足第 n 条模糊规则的系数矩阵, C_i^n 根据实际控制需求进行选择, 可以是行向量或对角阵. 系统参数矩阵形式如下:

$$\mathcal{A}_i^n = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 3} & \mathbb{Z}^n \\ 0_{3 \times 3} & -\mathcal{M}^{-1} \mathcal{D} \end{bmatrix}, \mathcal{B}_i^n = \mathcal{B}_i, \mathcal{E}_i^n = \mathcal{E}_i,$$

$$\mathbb{Z}^1 = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbb{Z}^2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbb{Z}^3 = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbb{Z}^4 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

根据 \mathcal{A}_i^n 的定义, 可以得到

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{11}(\bar{h}_1(t)) &= \mathcal{T}_{21}(\bar{h}_1(t)), \\ \mathcal{T}_{31}(\bar{h}_1(t)) &= \mathcal{T}_{41}(\bar{h}_1(t)), \\ \mathcal{T}_{12}(\bar{h}_2(t)) &= \mathcal{T}_{32}(\bar{h}_2(t)), \\ \mathcal{T}_{22}(\bar{h}_2(t)) &= \mathcal{T}_{42}(\bar{h}_2(t)). \end{aligned}$$

需要注意的是

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{11}(\bar{h}_1(t)) + \mathcal{T}_{31}(\bar{h}_1(t)) &= 1, \\ \frac{1}{2} \mathcal{T}_{11}(\bar{h}_1(t)) - \frac{1}{2} \mathcal{T}_{31}(\bar{h}_1(t)) &= \bar{h}_1(t). \end{aligned} \quad (6)$$

因此有

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{11}(\bar{h}_1(t)) = \mathcal{T}_{21}(\bar{h}_1(t)) &= \frac{1}{2} + \bar{h}_1(t), \\ \mathcal{T}_{31}(\bar{h}_1(t)) = \mathcal{T}_{41}(\bar{h}_1(t)) &= \frac{1}{2} - \bar{h}_1(t). \end{aligned} \quad (7)$$

类似地, 有

$$\begin{aligned} \mathcal{T}_{12}(\bar{h}_2(t)) = \mathcal{T}_{32}(\bar{h}_2(t)) &= \\ &= -3 - 2\sqrt{3} + (4 + 2\sqrt{3})\bar{h}_2(t), \\ \mathcal{T}_{22}(\bar{h}_2(t)) = \mathcal{T}_{42}(\bar{h}_2(t)) &= \\ &= 4 + 2\sqrt{3} - (4 + 2\sqrt{3})\bar{h}_2(t). \end{aligned}$$

为了便于表述, 下面用 $\sum_{n=1}^4 g_{\partial(t)}^n$ 表示

$\sum_{n=1}^4 g_{\partial(t)}^n(\bar{h}(t))$. 借助这种 T-S 模糊方法, 非线性质量

切换UMV模型表示为

$$\begin{cases} \dot{\zeta}(t) = \sum_{n=1}^4 g_{\partial(t)}^n [\mathcal{A}_{\partial(t)}^n \zeta(t) + \mathcal{B}_{\partial(t)}^n u(t) + \mathcal{E}_{\partial(t)}^n \varpi(t)], \\ z(t) = \sum_{n=1}^4 g_{\partial(t)}^n C_{\partial(t)}^n \zeta(t). \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$g_{\partial(t)}^n = \frac{\mathcal{T}_{n1}(\bar{h}_1(t))\mathcal{T}_{n2}(\bar{h}_2(t))}{\sum_{n=1}^4 \mathcal{T}_{n1}(\bar{h}_1(t))\mathcal{T}_{n2}(\bar{h}_2(t))},$$

$$\sum_{n=1}^4 g_{\partial(t)}^n = 1.$$

本文控制框图如图1所示.

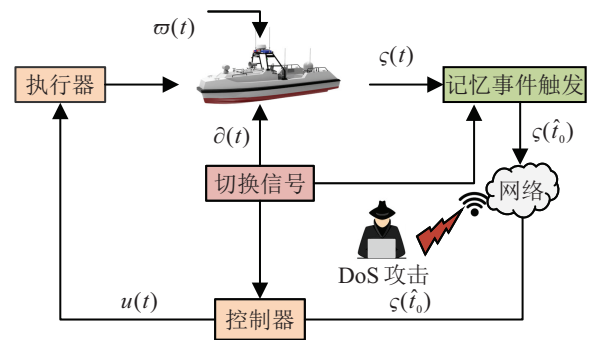


图1 控制框图

1.2 动态记忆事件触发机制

一个带有记忆项的动态记忆事件触发机制设计如下:

$$t_{o+1} = \inf\{t > t_o \mid -\mathcal{G}(t) + \mathcal{L}[e^T(t) \Pi_{\partial(t)} e(t) - \kappa \zeta^T(t) \Pi_{\partial(t)} \zeta(t)] \geq 0\}, o \in N. \quad (9)$$

其中: $\mathcal{L} > 0, 0 < \kappa < 1, e(t) = \zeta(t_o) - \zeta(t)$ 为状态误差. 动态变量 $\mathcal{G}(t)$ 满足

$$\begin{aligned} \dot{\mathcal{G}}(t) &= -\varepsilon \mathcal{G}(t) + \kappa \zeta^T(t) \Pi_{\partial(t)} \zeta(t) - \\ &= e^T(t) \Pi_{\partial(t)} e(t) + \mathcal{P} e^{-\varepsilon \mathcal{G}(t-\tilde{\tau})} \mathcal{G}(t-\tilde{\tau}). \end{aligned} \quad (10)$$

其中: $\mathcal{G}(0) = \mathcal{G}_0 \geq 0, 2\varepsilon - \mathcal{P} - 1 > \mathcal{L}$, 常数 $\mathcal{P} > 0, \varepsilon > 0, \tilde{\tau} > 0, \varepsilon > 0$. 当 $t \in [-\tilde{\tau}, 0]$ 时, $\dot{\mathcal{G}}(t) > 0$.

注1 为了节省有限的通信资源, 本文引入一种动态记忆事件触发机制. 不同于目前文献[4, 6, 9]主流的动态事件触发机制, 其事件触发阈值受历史触发信息 $\mathcal{G}(t-\tilde{\tau})$ 的影响. 动态变量 $\mathcal{G}(t)$ 随 $\mathcal{G}(t-\tilde{\tau})$ 更新, 这使得 $\mathcal{G}(t)$ 具有了记忆性. $\tilde{\tau}$ 称为记忆跨度, 当 $\mathcal{P} = 0$ 时, 动态记忆事件触发机制退化为普通的动态事件触发机制.

1.3 拒绝服务攻击与控制器设计

对于质量切换UMV而言, 传感器、控制器与执行器之间通常依靠通信网络传输信息. 假定 DoS 攻

击干扰UMV的通信网络,使得传感器到控制器、控制器到执行器的通信均受阻. DoS建模为

$$S_{\text{Dos}}(t) = \begin{cases} 0, & t \in \mathbb{T}_0^n; \\ 1, & t \in \mathbb{T}_1^n. \end{cases}$$

将 $\mathbb{T}_0^n \triangleq [nT + T_{\text{off}}, (n + 1)T)$ 称为攻击活跃区间, $\mathbb{T}_1^n \triangleq [nT, nT + T_{\text{off}})$ 称为休眠区间. 常数 T 代表一个攻击周期, $\Delta_s \triangleq [t_o, t_{o+1})$.

设计 DoS 攻击下的控制器

$$u(t) = \begin{cases} \sum_{n=1}^4 g_{\partial(t)}^n(t_o) L_{\partial(t)}^n \varsigma(t_o), & t \in \mathbb{T}_1^n \cap \Delta_s; \\ 0, & t \in \mathbb{T}_0^n. \end{cases} \quad (11)$$

令 $e(t) = \varsigma(t_o) - \varsigma(t)$, 可以得到闭环系统

$$\begin{cases} \dot{\varsigma}(t) = A_{\partial(t)} \varsigma(t) + B_{\partial(t)} e(t) + E_{\partial(t)} \varpi(t), \\ z(t) = C_{\partial(t)} \varsigma(t). \end{cases} \quad (12)$$

其中

$$\begin{aligned} A_i &= \sum_{n=1}^4 \sum_{m=1}^4 g_i^n g_i^m (\mathcal{A}_i^n + \mathcal{B}_i^n L_i^m), \\ E_i &= \sum_{n=1}^4 g_i^n \mathcal{E}_i^n, \\ B_i &= \sum_{n=1}^4 \sum_{m=1}^4 g_i^n g_i^m (\mathcal{B}_i^n L_i^m), \\ C_i &= \sum_{n=1}^4 g_i^n C_i^n. \end{aligned}$$

1.4 控制目标

对于 DoS 攻击下的闭环系统(12), 如果存在动态记忆事件触发机制(9)及控制器(11), 使得:

1) 若干扰 $\varpi(t)$ 存在, 则闭环系统(12)满足实际稳定性;

2) 若干扰 $\varpi(t)$ 不存在, 则闭环系统(12)满足 L_2 增益性能

$$\int_0^\infty e^{-\alpha t} z^T(t) z(t) dt \leq \theta^2 \int_0^\infty \varpi^T(t) \varpi(t) dt + \chi. \quad (13)$$

其中: $\varpi(t) \in L_2[0, \infty)$, 常数 $\theta > 0, \chi > 0, \theta$ 称为 L_2 增益指标. 则称 DoS 攻击下质量切换 UMV(12) 的动态记忆事件触动力定位控制问题可解.

2 主要结果

本节给出保证 DoS 攻击下闭环系统(12)动态记忆事件触动力定位控制问题可解充分条件.

定理 1 对于闭环系统(12), 在拒绝服务攻击 $S_{\text{Dos}}(t)$ 下, 给定常数 $\theta > 0, \mu > 1, \mu_{0,1}, \mu_{1,0} > 1, 0 < \kappa < 1, \rho_0 > 0, \rho_1 > 0$, 如果存在矩阵 L_i^m, Π_i 和正定

矩阵 P_i^0, P_i^1 使得如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Xi_{1i} & P_i^1 B_i & P_i^1 E_i & 0 \\ * & -\Pi_i & 0 & 0 \\ * & * & -\theta^2 I & 0 \\ * & * & * & \rho_1 - \epsilon \end{bmatrix} < 0, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Xi}_{1i} & P_i^0 B_i & P_i^0 E_i & 0 \\ * & -\Pi_i & 0 & 0 \\ * & * & -\theta^2 I & 0 \\ * & * & * & -\rho_0 - \epsilon \end{bmatrix} < 0, \quad (15)$$

$$P_i^1 \leq \mu P_j^1, P_i^0 \leq \mu P_j^0, \quad (16)$$

$$P_i^0 \leq \mu_{0,1} P_i^1, P_i^1 \leq \mu_{1,0} P_i^0, \quad (17)$$

$$\gamma = \rho_0(T - T_{\text{off}}) - \rho_1 T_{\text{off}} + \ln(\mu_{0,1} \mu_{1,0}) < 0, \quad (18)$$

则在满足平均驻留时间约束

$$\tau_s > -\frac{T \ln \mu}{\gamma} \quad (19)$$

下, 事件触发机制(9)与控制器(11)可解决 DoS 攻击下基于动态记忆事件触发机制的动力定位控制问题.

证明 当系统(12)处于休眠区间, 即 $t \in \mathbb{T}_1^n \cap \Delta_s$ 时, 对于工作在第 i 个模式下的质量切换 UMV, 选取李雅普诺夫函数

$$\bar{Z}_i^1(\varsigma(t)) = \varsigma^T(t) P_i^1 \varsigma(t), \quad i \in Q. \quad (20)$$

设计辅助函数

$$Z_i^1(\varsigma(t)) = \varsigma^T(t) P_i^1 \varsigma(t) + \mathcal{G}(t), \quad i \in Q. \quad (21)$$

从而可以得到

$$\dot{Z}_i^1(\varsigma(t)) + \rho_1 Z_i^1(\varsigma(t)) + \delta(t) - \varphi_0 \leq$$

$$\begin{bmatrix} \varsigma(t) \\ e(t) \\ \varpi(t) \\ \sqrt{\mathcal{G}}(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Xi_{1i} & P_i^1 B_i & P_i^1 E_i & 0 \\ * & -\Pi_i & 0 & 0 \\ * & * & -\theta^2 I & 0 \\ * & * & * & \Xi_{4i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varsigma(t) \\ e(t) \\ \varpi(t) \\ \sqrt{\mathcal{G}}(t) \end{bmatrix}.$$

其中

$$\begin{aligned} \Xi_{1i} &= P_i^1 A_i + A_i^T P_i^1 + \rho_1 P_i^1 + C_i^T C_i + \kappa \Pi_i, \\ \Xi_{4i} &= \rho_1 - \epsilon. \end{aligned}$$

借助式(14), 令 $\varphi_0 = \mathcal{P} \bar{\mathcal{G}}, \delta(t) = z^T(t) z(t) - \theta^2 \varpi^T(t) \varpi(t)$, 则下式成立:

$$\dot{Z}_i^1(\varsigma(t)) + \rho_1 Z_i^1(\varsigma(t)) + \delta(t) \leq \varphi_0. \quad (22)$$

当 $\varpi(t) = 0$ 时, 易知

$$\dot{Z}_i^1(\varsigma(t)) \leq -\rho_1 Z_i^1(\varsigma(t)) + \varphi_0. \quad (23)$$

令 $t_{n,1} = nT, t_{n,2} = nT + T_{\text{off}}$. 在区间 $[t_{n,1}, t)$ 上对式(23)积分可得

$$Z_i^1(t) \leq e^{-\rho_1(t-t_{n,1})} Z_i^1(t_{n,1}) + \frac{\varphi_0}{\rho_1} (1 - e^{-\rho_1(t-t_{n,1})}).$$

当闭环系统的时间 $t \in \mathbb{T}_0^n$ 时, 同样设计辅助函数

$$Z_i^0(\varsigma(t)) = \varsigma^T(t) P_i^0 \varsigma(t) + \mathcal{G}(t), \quad i \in Q. \quad (24)$$

经过推导可得

$$\begin{aligned} \dot{Z}_i^0(\varsigma(t)) - \rho_0 Z_i^0(\varsigma(t)) + \delta(t) - \varphi_0 \leq \\ \begin{bmatrix} \varsigma(t) \\ e(t) \\ \varpi(t) \\ \sqrt{\mathcal{G}}(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tilde{\Xi}_{1i} & P_i^0 B_i & P_i^0 E_i & 0 \\ * & -\Pi_i & 0 & 0 \\ * & * & -\theta^2 I & 0 \\ * & * & * & \tilde{\Xi}_{4i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varsigma(t) \\ e(t) \\ \varpi(t) \\ \sqrt{\mathcal{G}}(t) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{\Xi}_{1i} &= P_i^0 A_i + A_i^T P_i^0 - \rho_0 P_i^0 + C_i^T C_i + \kappa \Pi_i, \\ \tilde{\Xi}_{4i} &= -\rho_0 - \epsilon. \end{aligned}$$

类似地, 可以推导出

$$Z_i^0(t) \leq e^{\rho_0(t-t_{n,2})} Z_i^0(t_{n,2}) + \frac{\varphi_0}{\rho_0} (e^{\rho_0(t-t_{n,2})} - 1). \quad \square$$

下面针对干扰 $\varpi(t)$ 是否存在分两种情况讨论.

情况1 若干扰 $\varpi(t)$ 不存在, 则如下分段李雅普诺夫函数成立:

$$Z(t) \leq \begin{cases} e^{-\rho_1(t-t_{n,1})} Z_i^1(t_{n,1}) + \frac{\varphi_0}{\rho_1} A_1, & t \in \mathbb{T}_1^n; \\ e^{\rho_0(t-t_{n,2})} Z_i^0(t_{n,2}) + \frac{\varphi_0}{\rho_0} A_0, & t \in \mathbb{T}_0^n. \end{cases} \quad (25)$$

其中: $A_1 = 1 - e^{-\rho_1(t-t_{n,1})}$, $A_0 = e^{\rho_0(t-t_{n,2})} - 1$.

对于 $t \in [t_{n,1}, t_{n+1,1})$, 联立式(17)和(18)可得 $Z_i^1(t_{n,2}^+) \leq \mu_{0,1} Z_i^0(t_{n,2}^-)$, $Z_i^0(t_{n,1}^+) \leq \mu_{1,0} Z_i^1(t_{n,1}^-)$. 如果 $t \in \mathbb{T}_1^n$, 则有

$$\begin{aligned} Z(t) &\leq \\ e^{-\rho_1(t-t_{n,1}^+)} \mu^{N_{\partial}(t_{n,1}^+, t)} Z(t_{n,1}^+) + \frac{\varphi_0}{\rho_1} A_1 &\leq \\ \mu_{1,0} e^{-\rho_1(t-t_{n,1}^+)} \mu^{N_{\partial}(t_{n,1}^+, t)} Z(t_{n,1}^+) + \frac{\varphi_0}{\rho_1} &\leq \dots \leq \\ e^{N_0 \ln \mu} e^{\frac{\ln \mu}{\tau_s} t + n\gamma} Z(0) + \frac{\varphi_0}{\rho_1}. \end{aligned}$$

利用 $t > nT$ 可得

$$Z(t) \leq e^{N_0 \ln \mu - \frac{\gamma T_{\text{off}}}{T}} e^{(\frac{\ln \mu}{\tau_s} + \frac{\gamma}{T})t} Z(0) + \frac{\varphi_0}{\rho_1}. \quad (26)$$

如果 $t \in \mathbb{T}_0^n$, 则有

$$\begin{aligned} Z(t) &\leq \\ e^{\rho_0(t-t_{n,2}^+)} \mu^{N_{\partial}(t_{n,2}^+, t)} Z(t_{n,2}^+) + \frac{\varphi_0}{\rho_0} A_0 &\leq \\ \mu_{0,1} e^{\rho_0(t-t_{n,2}^+)} \mu^{N_{\partial}(t_{n,2}^+, t)} Z(t_{n,2}^+) + \Delta_0 &\leq \dots \leq \\ \frac{1}{\mu_{1,0}} e^{N_0 \ln \mu} e^{(\frac{\ln \mu}{\tau_s} + \frac{\gamma}{T})t} Z(0) + \Delta_0, \end{aligned} \quad (27)$$

其中 $\Delta_0 = \frac{\varphi_0}{\rho_0} e^{\rho_0(T-T_{\text{off}})}$. 因此, 结合式(26)和(27)可得

$$Z(t) \leq a e^{\psi t} Z(0) + \Delta_3. \quad (28)$$

其中

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{\ln \mu}{\tau_s} + \frac{\gamma}{T}, \\ a &= \max \left\{ e^{N_0 \ln \mu - \frac{\gamma T_{\text{off}}}{T}}, \frac{1}{\mu_{1,0}} e^{N_0 \ln \mu} \right\}, \\ \Delta_3 &= \max \left\{ \frac{\varphi_0}{\rho_1}, \Delta_0 \right\}. \end{aligned}$$

由式(28)可知, 当干扰 $\varpi(t) = 0$ 时, 闭环系统(12)是实际稳定的.

情况2 若干扰 $\varpi(t)$ 存在, 则易得

$$\begin{cases} \dot{Z}_i^1(t) + \rho_1 Z_i^1(t) + \delta(t) < \varphi_0, & t \in \mathbb{T}_1^n; \\ \dot{Z}_i^0(t) - \rho_0 Z_i^0(t) + \delta(t) < \varphi_0, & t \in \mathbb{T}_0^n. \end{cases} \quad (29)$$

进一步推导可得

$$\begin{aligned} Z(t) &\leq e^{\Delta_5 + \frac{\gamma}{T} t} \mu^{N_{\partial}(0,t)} Z(0) - \\ &\int_0^t \mu^{N_{\partial}(\nu,t)} e^{\frac{\gamma}{T}(t-\nu)} J(\nu) d\nu, \end{aligned} \quad (30)$$

且有

$$\begin{aligned} \Delta_5 &= \max \left\{ -\ln \mu_{1,0}, -\frac{\gamma T_{\text{off}}}{T} \right\}, \\ (\nu) &= \delta(\nu) - \varphi_0. \end{aligned}$$

将式(30)两边同时除以 $\mu^{N_{\partial}(0,t)}$, 两侧从 $0 \rightarrow \infty$ 进行积分可得

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \int_0^t e^{\frac{\gamma}{T} t} [z^T(\nu) z(\nu) - \varphi_0] d\nu dt &\leq \\ \Delta_6 + \Theta_1^2 \int_0^\infty \int_0^t e^{\frac{\gamma}{T}(t-\nu)} \varpi^T(\nu) \varpi(\nu) d\nu dt. \end{aligned} \quad (31)$$

其中

$$\Delta_6 = \int_0^\infty e^{\Delta_5 + \frac{\gamma}{T} t} Z(0) dt, \quad \Theta_1^2 = e^{\Delta_5} \theta^2.$$

进而可得

$$\begin{aligned} \int_0^\infty e^{\frac{\gamma}{T} \nu} [z^T(\nu) z(\nu) - \varphi_0] d\nu &\leq \\ e^{\Delta_5} Z(0) + \Theta_1^2 \int_0^\infty \varpi^T(\nu) \varpi(\nu) d\nu. \end{aligned} \quad (32)$$

这使得

$$\int_0^\infty e^{\frac{\gamma}{T} \nu} z^T(\nu) z(\nu) d\nu \leq \Theta_1^2 \int_0^\infty \varpi^T(\nu) \varpi(\nu) d\nu + \chi \quad (33)$$

成立, 其中 $\chi = e^{\Delta_5} Z(0) - \frac{\varphi_0 T}{\gamma}$.

注2 定理1建立了质量切换UMV系统保证 H_∞ 性能的稳定条件. DoS攻击下系统稳定性的分析考虑了攻击期和休眠期两种情况. 在动态记忆事件触发动力定位控制策略下, 保证了质量切换UMV系统在周期性DoS攻击及满足平均驻留时间约束下能够达到理想的 H_∞ 性能.

下面给出解决DoS攻击下质量切换UMV的动态记忆事件触发动力定位控制问题可解的充分条件.

定理2 考虑闭环系统(12), 如果对于给定常数 $\theta > 0$, $0 < \kappa < 1$, $\rho_1 > 0$, $\epsilon > 0$, 存在矩阵 \bar{L}_i^m , Π_i 和正定矩阵 \bar{P}_i^1 使得如下不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{11i} & \Psi_{12i} & \sum_{n=1}^4 g_i^n \mathcal{E}_i^n & 0 & \Psi_{15i} \\ * & \Psi_{22i} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\theta^2 I & 0 & 0 \\ * & * & * & \Psi_{44} & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0. \quad (34)$$

其中

$$\begin{aligned} \Psi_{11i} &= \sum_{n=1}^4 \sum_{m=1}^4 g_i^n g_i^m [\tilde{\Psi}_{11i} + \bar{P}_i^1 \rho_1] - \kappa \Psi_{22i}, \\ \tilde{\Psi}_{11i} &= \mathcal{A}_i^n \bar{P}_i^1 + \mathcal{B}_i^n \bar{L}_i^m + \bar{P}_i^1 \mathcal{A}_i^{nT} + \bar{L}_i^{mT} \mathcal{B}_i^{nT}, \\ \Psi_{12i} &= \sum_{n=1}^4 \sum_{m=1}^4 g_i^n g_i^m \mathcal{B}_i^n \bar{L}_i^m, \quad \Psi_{22i} = -\bar{P}_i^1 \Pi_i \bar{P}_i^1, \\ \Psi_{15i} &= \bar{P}_i^1 \sum_{n=1}^4 g_i^n C_i^{nT}, \quad \Psi_{44} = \rho_1 - \epsilon. \end{aligned}$$

则在动态记忆事件触发机制(9)下,控制器(11)可以解决DoS攻击下闭环系统(12)的动力定位问题.此外,控制器增益可以表示为 $L_i^m = \bar{L}_i^m \bar{P}_i^{1^{-1}}$, $i \in Q$.

证明 令 $\bar{P}_i^1 = P_i^{1^{-1}}$,在式(14)两侧同时乘以 $\text{diag}\{P_i^{1^{-1}}, P_i^{1^{-1}}, I\}$ 可得

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{1i} & B_i P_i^{1^{-1}} & E_i & 0 \\ * & -\Gamma_{2i} & 0 & 0 \\ * & * & -\theta^2 I & 0 \\ * & * & * & \rho_1 - \epsilon \end{bmatrix} < 0. \quad (35)$$

其中

$$\begin{aligned} \Psi_{1i} &= A_i \bar{P}_i^1 + \bar{P}_i^1 A_i^T + \rho_1 \bar{P}_i^1 + \bar{P}_i^1 C_i^T C_i \bar{P}_i^1 + \kappa \Gamma_{2i}, \\ \Psi_{2i} &= \bar{P}_i^1 \Pi_i \bar{P}_i^1. \end{aligned}$$

将闭环系统(12)中 A_i 、 B_i 、 C_i 、 E_i 的具体形式代入上式,并令 $\bar{L}_i^m = L_i^m \bar{P}_i^1$ 可得

$$\begin{bmatrix} \hat{\Psi}_{11i} & \Psi_{12i} & \sum_{n=1}^4 g_i^n \mathcal{E}_i^n & 0 \\ * & \Psi_{22i} & 0 & 0 \\ * & * & -\theta^2 I & 0 \\ * & * & * & \Psi_{44} \end{bmatrix} < 0, \quad (36)$$

其中 $\hat{\Psi}_{11i} = \Psi_{11i} + \bar{P}_i^1 \sum_{n=1}^4 g_i^n C_i^{nT} C_i^n \bar{P}_i^1$. 利用舒尔补引理可知式(36)与(34)等价. \square

注3 定理2给出了DoS攻击下质量切换UMV动态记忆事件触动力定位控制器的设计过程.通过求解线性矩阵不等式(34),可以求出动力定位控制器的增益.

下面证明动态记忆事件触发机制(34)存在芝诺行为.

定理3 给定参数 $\mathcal{L} > 0, 0 < \kappa < 1, \theta > 0, \varrho_g \geq 0, \varrho_\varsigma \geq 0, \varrho_\theta \geq 0$. 对于闭环系统(12),假设 $\|\varsigma(0)\| \leq$

$\varrho_\varsigma, \|\varpi(0)\| \leq \varrho_\varpi, \|\mathcal{G}(0)\| \leq \varrho_\theta, \varsigma(0) > 0$, 如果存在常数 $\varrho > 0$ 满足

$$t_{o+1} - t_o \geq \begin{cases} \frac{1}{d_3} \ln \left(\frac{d_3}{d_2} \sqrt{\varrho} + 1 \right), & d_3 \neq 0; \\ \frac{1}{d_2} \sqrt{\varrho}, & d_3 = 0. \end{cases} \quad (37)$$

其中

$$\begin{aligned} d_1 &= \left\{ \frac{1}{\lambda(P_i^1)} (e^{-\rho_1 t} \bar{\lambda}(P_i^1) \varrho_\varsigma^2 + e^{-\rho_1 t} \varrho_\theta + d_4) \right\}^{1/2}, \\ d_2 &= \|A_i\| d_1 + \|E_i\| \varrho_\varpi, \quad d_3 = \|B_i\|, \\ d_4 &= \frac{\theta^2 \varrho_\varpi^2 + \varphi_0}{\rho_1}. \end{aligned}$$

则事件触发机制(9)不会产生芝诺行为.

证明 当 $t \in \mathbb{T}_i^n \cap \Delta_s$ 且UMV处于第*i*个模式,则易推导得

$$\|\dot{e}(t)\| \leq \|A_i\| \|\varsigma(t)\| + \|E_i\| \|\varpi(t)\| + \|B_i\| \|e(t)\|. \quad (38)$$

结合式(29)可得

$$\begin{aligned} \dot{\bar{Z}}_i^1(\varsigma(t)) + \rho_1 \bar{Z}_i^1(\varsigma(t)) + (1 + \rho_1) \mathcal{G}(t) &\leq \\ \theta^2 \varpi^T(t) \varpi(t) + \varphi_0. &\quad (39) \end{aligned}$$

利用 $\varsigma(t) \geq 0$ 可得

$$\bar{Z}_i(\varsigma(t)) \leq e^{-\rho_1 t} (\bar{Z}_i(\varsigma(0)) + \mathcal{G}(0)) + \frac{\theta^2 \varrho_\varpi^2 + \varphi_0}{\alpha_0}.$$

令 $\underline{\lambda}$ 和 $\bar{\lambda}$ 分别表示最小、最大特征值,有

$$\begin{aligned} \underline{\lambda}(P_i) \|\varsigma(t)\| &\leq e^{-\rho_1 t} \bar{\lambda}(P_i) \|\varsigma(0)\| + \\ e^{-\rho_1 t} \|\mathcal{G}(0)\| &+ \frac{\theta^2 \varrho_\varpi^2 + \varphi_0}{\alpha_0}, \quad (40) \end{aligned}$$

进而有 $\|\varsigma(t)\|^2 \leq d_1^2$. 结合式(38)和(40)可得 $\|\dot{e}(t)\| \leq d_2 + d_3 \|e(t)\|$. 因此有

$$\|e(t)\| \leq \begin{cases} \frac{d_2}{d_3} (e^{d_3(t-t_o)} - 1), & d_3 \neq 0; \\ d_2(t - t_o), & d_3 = 0. \end{cases} \quad (41)$$

利用动态记忆事件触发机制(9),若系统处于触发区间 $t \in [t_o, t_{o+1})$,则可以推断 $\mathcal{G}(t) + \mathcal{L}[\kappa \varsigma^T(t) \Pi_i \varsigma(t) - e^T \Pi_i e(t)] < 0$, 并且 $\dot{\mathcal{G}}(t) > -(\epsilon + \frac{1}{\mathcal{L}}) \mathcal{G}(t)$. 那么在触发时刻 t_{o+1} , 很容易推导出

$$0 \leq \mathcal{L} \underline{\lambda}(\Pi_i) \|e(t_{o+1})\|^2. \quad (42)$$

于是,存在常数 ϱ 满足

$$0 < \varrho \leq [e^{-[\epsilon + (1/\mathcal{L})]t_{o+1}} \mathcal{G}(0)] \frac{1}{\underline{\lambda}(\Pi_i)}. \quad (43)$$

结合式(41)和(42)可推导得到

$$t_{o+1} - t_o \geq \frac{1}{d_3} \ln \left(\frac{d_3}{d_2} \sqrt{\varrho} + 1 \right) > 0. \quad (44)$$

当 $d_3 = 0$ 时,可知

$$t_{o+1} - t_o \geq \frac{1}{d_2} \sqrt{\varrho} > 0. \quad (45)$$

定理3得证. □

3 仿真验证

考虑UMV执行探测任务. UMV质量最初为103 kg,在释放自主探测器后减少到71 kg. 无人艇初始位置为 $\alpha(0) = [5\text{ m}, 5\text{ m}, 1.5^\circ]$,初始速度为 $\vartheta(t) = [0\text{ m/s}, 0\text{ m/s}, 0^\circ/\text{s}]$.

仿真结果如图2~图5所示. 由图2和图3可以看到,状态逐渐收敛直至稳定. 由图4和图5可以看到,动态记忆事件触发更能节省通信资源. 这表明本文提出的基于动态记忆事件触发机制的非线性质量切换UMV动力定位控制方案切实可行.

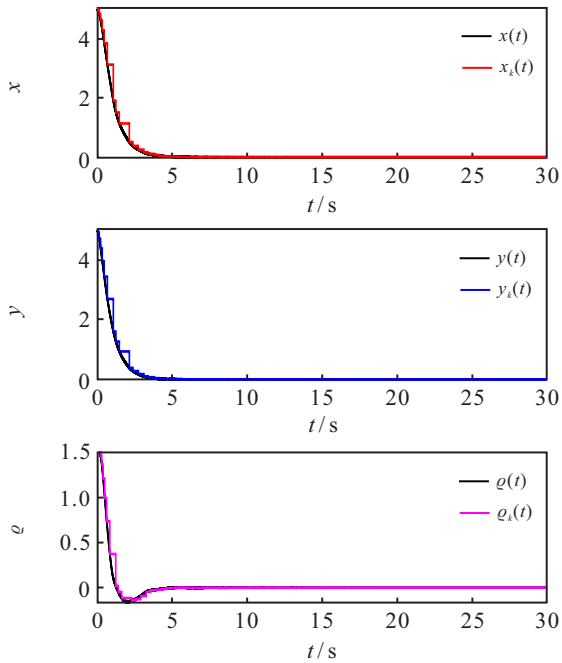


图2 位置及航向角实际曲线及采样曲线

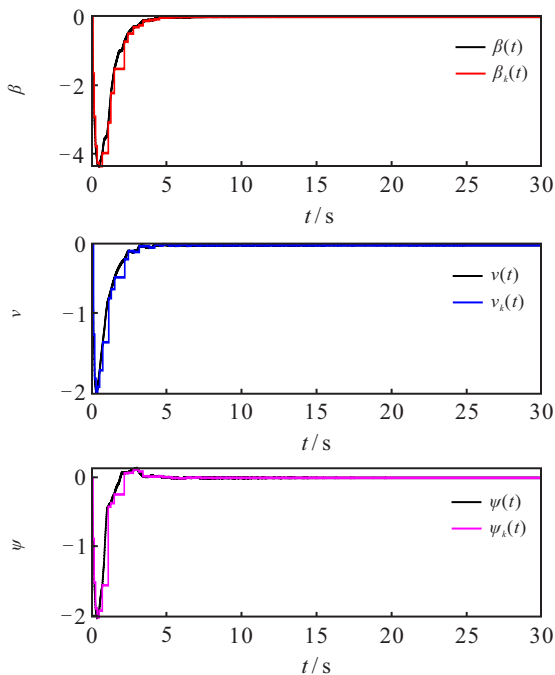


图3 速度及偏航速度实际曲线及采样曲线

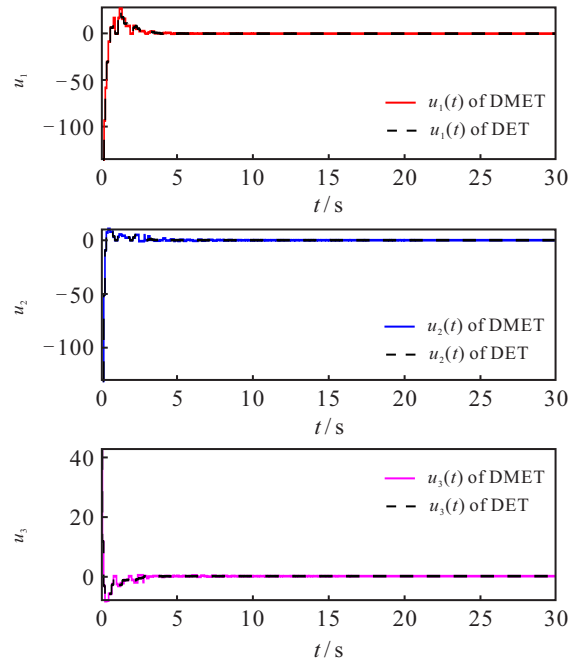


图4 控制输入对比曲线

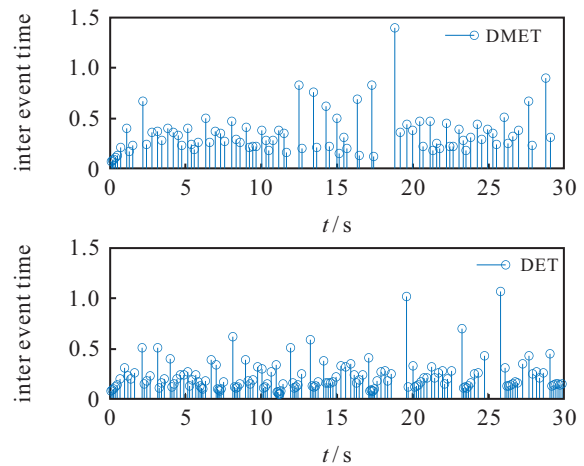


图5 记忆事件触发与无记忆事件触发次数对比曲线

4 结论

本文研究了非线性质量切换UMV在DoS攻击下动态记忆事件触动力定位控制问题. 首先,根据UMV质量变化的特点,提出了一种新的T-S模糊切换模型以描述其非线性特点与质量切换行为;其次,为了利用历史事件触发信息,引入动态记忆事件触发机制;然后,在考虑该机制和DoS攻击的基础上,采用多Lyapunov函数技术,在平均驻留时间依赖的切换信号下提出了问题的可解性判据. 仿真结果验证了所提出DoS攻击下非线性质量切换UMV的动态记忆事件触动力定位控制方案的有效性. 在未来的研究中,可拓展考虑执行器饱和及网络时延的情况.

参考文献(References)

[1] Zhang G Q, Lv S N, Huang C F, et al. Robust adaptive control for dynamic positioning vehicles in presence of

- adjustable threshold rule and input constraints[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 282: 114950.
- [2] Gu Z, Shi P, Yue D, et al. Memory-based continuous event-triggered control for networked T-S fuzzy systems against cyberattacks[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, 29(10): 3118-3129.
- [3] 苑守正, 刘志林, 郑林焯, 等. 基于事件触发自适应时域MPC的船舶靠泊方法[J]. *控制与决策*, 2024, 39(1): 336-344.
(Yuan S Z, Liu Z L, Zheng L H, et al. Ship berthing based on event-triggered adaptive horizon MPC[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(1): 336-344.)
- [4] Ma L, Wang Y L, Han Q L. Event-triggered dynamic positioning for mass-switched unmanned marine vehicles in network environments[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(5): 3159-3171.
- [5] Zhao Y, Lin F L, Guo G. Composite anti-disturbance dynamic positioning for mass-switched unmanned marine vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024, 9(1): 1890-1898.
- [6] Song W T, Tong S C. Event-triggered fuzzy finite-time reliable control for dynamic positioning of nonlinear unmanned marine vehicles[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 113139.
- [7] Liu Q, Long Y, Li T, et al. Fault detection for unmanned marine vehicles under replay attack[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2022, 31(5): 1716-1728.
- [8] Zhao Y, Guo S X, Huang J, et al. Dynamic memory event-triggered dynamic positioning for nonlinear mass-switched unmanned marine vehicles[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 305: 117879.
- [9] Fei Z Y, Shi S, Ahn C K, et al. Finite-time control for switched T-S fuzzy systems via a dynamic event-triggered mechanism[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, 29(12): 3899-3909.
- [10] 李志勇, 谈世磊. 基于周期事件触发机制的分布式资源分配算法[J]. *控制与决策*, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0351.
(Li Z Y, Tan S L. Periodic event-triggered mechanism based distributed resource allocation algorithm[J]. *Control and Decision*, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0351.)
- [11] 席阿行, 蔡远利. 事件触发机制的多弹分布式微分对策制导律[J]. *控制与决策*, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0807.
(Xi A X, Cai Y L. Event-triggered-based distributed differential game guidance laws[J]. *Control and Decision*, DOI: 10.13195/j.kzyjc.2024.0807.)
- [12] 吴劲松, 邱爱兵, 顾菊平, 等. 基于诊断观测器的最优事件触发故障检测[J]. *控制与决策*, 2024, 39(2): 559-567.
(Wu J S, Qiu A B, Gu J P, et al. Optimal event-triggered fault detection based on diagnostic observer[J]. *Control and Decision*, 2024, 39(2): 559-567.)
- [13] Mu X F, Gu Z, Hua L Z. Memory-based event-triggered leader-following consensus for T-S fuzzy multi-agent systems subject to deception attacks[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2022, 359(1): 599-618.
- [14] Hou Q H, Dong J X. Finite-time membership function-dependent H_∞ control for T-S fuzzy systems via a dynamic memory event-triggered mechanism[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2023, 31(11): 4075-4084.
- [15] Ye Z H, Zhang D, Cheng J, et al. Event-triggering and quantized sliding mode control of UUV systems under DoS attack[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2022, 71(8): 8199-8211.
- [16] Zhao R, Zuo Z Q, Wang Y J. Event-triggered control for switched systems with denial-of-service attack[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2022, 67(8): 4077-4090.
- [17] Dong J H, Ye Z H, Zhang D. Finite-time security control of networked unmanned marine vehicle systems subject to DoS attack[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2024, 9(2): 3464-3477.
- [18] Ma Y, Nie Z Q, Hu S L, et al. Fault detection filter and controller co-design for unmanned surface vehicles under DoS attacks[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(3): 1422-1434.

作者简介

赵颖(1989—), 女, 副教授, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为切换系统、事件触发控制, E-mail: yingz@dlnu.edu.cn;

郭世旭(2000—), 男, 硕士, 主要研究方向为切换系统、船舶运动控制, E-mail: shixuguo@dlnu.edu.cn;

黄进(1971—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为机器人理论与应用、船舶运动控制, E-mail: jinhuang@dlnu.edu.cn.