

DoS攻击下多无人机群体智能系统分布式 一致性跟踪控制

张 猛^{1*}, 王新河¹, 王利楠²

(1. 东南大学网络空间安全学院, 江苏南京 211189; 2. 北京理工大学长三角研究院(嘉兴), 浙江嘉兴 314003)

摘要: 群体智能作为人工智能的重要前沿研究方向,在复杂环境感知、分布式决策、协同执行以及无人系统集群控制等领域具有广阔应用前景。多无人机系统作为群体智能的重要物理载体,因其高机动性、部署灵活性和协同能力强等特点,在灾害救援、区域巡检、目标搜索、环境监测和应急通信等场景中展现出重要应用价值。然而,现有多无人机一致性控制研究大多基于理想通信假设,通常默认通信链路持续可用、信息传输精确且网络攻击可忽略,因而难以适应复杂、开放、动态的实际网络环境。尤其在开放网络条件下,通信网络往往同时受到有限带宽和拒绝服务(Denial-of-Service, DoS)攻击的双重影响,有限带宽限制了无人机间状态信息的连续高精度传输,DoS攻击则会导致通信链路间歇性中断,使控制输入更新受阻、跟踪误差增大,甚至影响系统稳定性。因此,研究带宽受限与DoS攻击共同作用下多无人机系统的分布式一致性跟踪控制问题具有重要理论意义和工程价值。针对上述问题,本文研究了DoS攻击和通信带宽受限双重约束下多无人机系统的一致性跟踪控制问题,提出了一种基于有限量化通信的分布式控制协议。针对周期采样通信机制,构建了包含自适应缩放因子的动态量化函数,使量化器工作范围能够根据系统状态变化在线调节,从而在降低通信负载的同时提高量化机制对状态演化的适应能力,避免固定量化范围内可能出现的量化精度不足和量化饱和问题。为减弱DoS攻击导致通信中断对系统协同性能的不利影响,进一步引入状态估计机制,在通信受阻期间利用系统模型和本地信息对邻居状态进行预测与补偿,使各无人机仍可维持控制输入更新,从而提高系统在攻击环境下的连续运行能力和抗干扰能力。基于Lyapunov稳定性理论,本文对闭环系统的稳定性和一致性跟踪性能进行了严格分析,建立了DoS攻击持续时间、攻击频率、采样周期、控制增益矩阵与量化参数之间的内在关系。研究表明,当DoS攻击持续时间和攻击频率满足给定上界约束时,通过合理设计控制增益矩阵、采样周期及量化器参数,可保证多无人机系统在有限量化通信条件下实现对领导者的渐近一致性跟踪,并保证动态量化器在整个控制过程中始终处于非饱和状态。数值仿真结果进一步表明,所提出的分布式量化控制协议在DoS攻击和通信带宽受限共同作用下仍能保持良好的跟踪精度、通信效率和抗攻击鲁棒性,验证了所提方法的有效性与优越性。

关键词: 多无人机群体智能系统;拒绝服务攻击;分布式控制;一致性跟踪;动态量化;有限通信带宽

基金项目: 中华人民共和国工业和信息化部项目(No.JCKY2024110C042)

中图分类号: TP13

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2026)03-0901-11

电子学报URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20251273

Distributed Consensus Tracking Control of Multi-UAV Swarm Intelligence Systems under DoS Attacks

ZHANG Meng^{1*}, WANG Xinhe¹, WANG Linan²

(1. School of Cyber Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 211189, China;

2. Changsanjiao Research Institute, Beijing Institute of Technology, Jiaxing, Zhejiang 314003, China)

Abstract: Swarm intelligence has emerged as an important frontier in artificial intelligence, with broad potential in complex-environment perception, distributed decision-making, cooperative task execution, and coordinated control of unmanned systems. As a representative physical platform for swarm intelligence, multi-unmanned aerial vehicle (UAV) systems have attracted considerable attention in disaster response, area surveillance, target search, environmental monitoring, and emergency communications due to their high maneuverability, flexible deployment, and strong cooperative capability. However, most existing studies on consensus control of multi-UAV systems rely on ideal communication assumptions, typically assuming continuously available links, accurate information exchange, and negligible cyberattacks. As a result, these methods are difficult to deploy in practical networked environments that are open, dynamic, and vulnerable to communication impairments. In particular, in open-network environments, communication channels are often simultaneously affected

by bandwidth limitations and denial-of-service (DoS) attacks. Bandwidth limitations preclude continuous high-precision exchange of state information among UAVs, whereas DoS attacks cause intermittent communication outages, thereby preventing timely control updates, increasing tracking errors, and potentially destabilizing the closed-loop system. Therefore, the study of distributed consensus tracking control for multi-UAV systems under the joint effects of bandwidth constraints and DoS attacks is of clear theoretical and practical significance. To address these challenges, this paper investigates the consensus tracking problem for multi-UAV systems under the dual constraints of DoS attacks and limited communication bandwidth, and develops a distributed control protocol based on finite-level quantized communication. Under a periodic sampling scheme, a dynamic quantizer with an adaptive scaling factor is introduced so that the quantization range can be adjusted online according to the system state. This design reduces the communication burden while improving the quantizer's ability to accommodate state evolution, thereby avoiding the loss of quantization accuracy and quantizer saturation associated with fixed-range quantization. To mitigate the degradation in coordination performance caused by DoS-induced communication outages, a state estimation mechanism is further incorporated. During communication interruptions, each UAV predicts and compensates for the states of its neighbors using the system model and locally available information, so that control updates can still be executed. As a result, the proposed scheme improves the continuity of system operation and enhances resilience against disturbances and malicious attacks. Using Lyapunov stability theory, this paper provides a rigorous analysis of the stability and consensus tracking performance of the closed-loop system, and establishes explicit relationships among the DoS attack duration, attack frequency, sampling period, control gain matrix, and quantization parameters. The analysis shows that, if the attack duration and attack frequency satisfy prescribed upper bounds, then asymptotic consensus tracking of the leader can be achieved under finite-level quantized communication by properly selecting the control gain matrix, sampling period, and quantizer parameters, while maintaining the dynamic quantizer in an unsaturated regime throughout the process. Numerical simulations further show that the proposed distributed quantized control protocol preserves satisfactory tracking accuracy, communication efficiency, and robustness under the combined effects of DoS attacks and bandwidth constraints, thus confirming the effectiveness and advantages of the proposed method.

Keywords: multi-UAV swarm intelligent systems; denial-of-service attacks; distributed control; consensus tracking; dynamic quantization; limited communication bandwidth

Foundation Item(s): Ministry of Industry and Information Technology of China (No.JCKY2024110C042)

0 引言

随着新一代人工智能深度融入国家产业变革,群体智能不仅是驱动“新质生产力”发展的核心动能,更被《新一代人工智能发展规划》确立为提升国家战略科技力量的主攻方向^[1]。依托分布式网络架构,多无人机系统已成为验证群体智能涌现机制与实现分布式协同的典型物理载体。凭借高机动性、部署灵活及成本低廉等优势,该系统在广域环境监测、灾害救援、目标搜索及物资投送等领域^[2-3]展现出广阔的应用前景。然而,随着群体智能应用场景向规模化、高动态化及强对抗化的演进^[4],多无人机系统的自主协同能力面临着更为严峻的挑战。特别是在动态开放的通信网络环境下^[5],多无人机系统的高精度协同作业高度依赖于系统的鲁棒性,这直接决定了群体智能系统的整体安全性与运行可靠性。因此,构建具备内生安全机制的分布式控制系统已成为支撑群体智能工程化落地的核心基石,其控制性能直接决定了集群任务的执行效率与成功率。其中,如何在网络攻击下实现多无人机的分布式控制,既是保障集群任务可靠性的关键环节,也是当前智能分布式控制领域亟须

攻克的关键科学问题之一。

多无人机分布式控制面临的网络攻击形式主要包括虚假数据注入(False Data Injection, FDI)攻击^[5]和拒绝服务(Denial-of-Service, DoS)攻击^[6]等。其中,FDI攻击的实施通常依赖于对通信网络拓扑和系统动力学模型的先验知识,通过对传输信息进行隐蔽篡改来误导控制决策。相比之下,DoS攻击无需任何系统内部信息,其通过持续占用通信带宽或主动阻断通信链路,致使关键信息无法及时传输,从而直接破坏无人机之间的正常通信。DoS攻击通常具有间歇性、随机性和不可预测性等特点,可能导致通信拓扑频繁切换甚至长时间中断,进而严重影响多无人机系统的协同控制性能与稳定性。因此,国内外学者对此开展了大量研究。例如,文献[7]在攻击频率和持续时间受约束的DoS攻击模型下,设计了一种反馈控制方法,实现了网络化控制系统的输入状态稳定性;文献[8]提出了一种随机分布式控制协议,实现了DoS攻击下多智能体系统的跟踪一致性;文献[9]则研究了线性多智能体系统在DoS攻击下的输出调节一致性问题。然而,上述研究大多假设通信容量无限,而在实际工程应用中,通信能力往往受限于有限的信道带宽。

现有研究大多基于通信容量不受限的理想前提下,然而在实际场景中,通信带宽受限与DoS攻击往往同时存在,从而对系统性能提出了更高要求。为缓解DoS攻击和通信带宽受限对系统性能的不利影响,量化控制^[10-12]通过采用有限精度信息替代连续状态传输,能够有效降低通信负担并减少对网络的依赖,从而增强系统在网络攻击环境下的鲁棒性。因此,在DoS攻击和通信带宽受限的双重约束条件下,基于量化机制的分布式控制研究受到广泛关注^[13-15]。例如,文献[13]针对量化一致性问题,探讨了通信容量和系统抗DoS攻击能力之间的权衡关系;在量化一致性的基础上,文献[14]提出了一种基于放大和保持策略的量化方法,用于实现DoS攻击下多智能体系统的输出一致性;文献[15]则针对具有输出反馈的离散时间系统,设计了动态量化控制策略以抵抗DoS攻击。综上所述,尽管现有研究在分别处理通信约束或网络攻击方面已取得一定进展,但在同时考虑通信带宽受限与DoS攻击双重现实约束的多无人机系统一致性跟踪控制方面,仍有待深入探索。特别是如何设计高效的分布式量化控制协议,使其在有限且不稳定的通信资源下,确保系统在遭受DoS攻击时,仍能保持精确的跟踪性能。这一问题的解决具有重要的理论意义与实际应用价值。

为此,本文针对性研究了通信带宽受限和DoS攻击双重约束下的多无人机系统一致性跟踪问题。本文主要贡献如下:(1)设计了一种基于动态量化器的分布式控制协议,该协议通过引入自适应缩放与状态估计机制,有效补偿DoS攻击期间的数据缺失;(2)利用Lyapunov稳定性理论,严格推导了在DoS攻击频率与持续时间满足给定上界的条件下,系统实现渐近一致性跟踪的充分条件,并给出了确保量化器不饱和的参数设计准则;(3)通过数值仿真验证了所设计控制协议的有效性,结果表明,该协议能在通信带宽受限与DoS攻击并存的双重约束下,保证系统的一致性跟踪精度,并显著提升其通信效率与抗干扰鲁棒性。

1 预备知识与问题描述

1.1 符号说明

对于实对称矩阵 $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$,若 $A > 0$,则称矩阵 A 为正定矩阵; $\lambda_m(A)$ 和 $\lambda_M(A)$ 分别表示矩阵 A 的最小和最大特征值;符号 $\|\cdot\|$ 和 $\|\cdot\|_\infty$ 分别表示欧几里得范数和无穷范数。

1.2 图论

多无人机系统的通信拓扑结构采用图论进行描述。考虑由 n 架无人机组成的系统,其通信网络可用有向图表示,其中,节点集 $V=[v_1, v_2, \dots, v_n]$ 对应各无

人机,边集 $E \subseteq V \times V$ 表示通信链路, $(v_j, v_i) \in E$ 意味着第 i 架无人机能够接收来自第 j 架无人机的信息,无人机 i 的邻居集定义为 $N_i = \{j: (j, i) \in E\}$ 。若存在一架无人机,使得从该节点出发沿有向路径可到达图中其他无人机节点,则称有向图 G 包含有一棵有向生成树。图 G 的邻接矩阵定义为 $A' = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{n \times n}$,其元数满足:当 $(v_j, v_i) \in E$ 时 $a_{ij} = 1$,否则 $a_{ij} = 0$ 。图 G 的度矩阵是一个对角矩阵,定义为 $D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n)$,其中 $d_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}$ 为节点 v_i 的度。基于此,拉普拉斯矩阵定义为 $L_G = D - A'$ 。

进一步考虑由 1 架领导者无人机和 n 架跟随者无人机组成的多无人机系统,为描述领导者与跟随者之间的信息交互,定义对角矩阵 $B = \text{diag}(b_1, b_2, \dots, b_n)$,其中 $b_i > 0$ 表示第 i 架跟随者无人机可直接接收领导者的参考信息,否则 $b_i = 0$ 。此外,记 $L \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 为仅包含跟随者无人机节点所构成的子图对应的拉普拉斯矩阵。

1.3 问题描述

考虑由 1 架虚拟领导者无人机和 n 架跟随无人机组成的多无人机系统。第 n 架跟随者无人机的动力学模型可表示为^[16]

$$\begin{cases} \dot{x}_{vi}(t) = g_i(t) \cos \varphi_i(t) \cos \psi_i(t) \\ \dot{y}_{vi}(t) = g_i(t) \cos \varphi_i(t) \sin \psi_i(t) \\ \dot{z}_{vi}(t) = g_i(t) \sin \varphi_i(t) \\ \dot{g}_i(t) = (g_{si}(t) - g_i(t)) / u_g \\ \dot{\varphi}_i(t) = (\varphi_{si}(t) - \varphi_i(t)) / u_\varphi \\ \dot{\psi}_i(t) = (\psi_{si}(t) - \psi_i(t)) / u_\psi \end{cases} \quad (1)$$

其中, $p_i(t) = [x_{vi}(t), y_{vi}(t), z_{vi}(t)]^T$ 为第 i 架跟随者无人机的位置向量, $g_i(t)$ 、 $\varphi_i(t)$ 和 $\psi_i(t)$ 分别为跟随者无人机的飞行速度、俯仰角和方位角, $g_{si}(t)$ 、 $\varphi_{si}(t)$ 和 $\psi_{si}(t)$ 分别为跟随者无人机的飞行速度、俯仰角和方位角的控制输入, u_g 、 u_φ 和 u_ψ 分别为各通道的时间常量。领导者无人机的动力学模型具有类似形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_{v0}(t) = g_0(t) \cos \varphi_0(t) \cos \psi_0(t) \\ \dot{y}_{v0}(t) = g_0(t) \cos \varphi_0(t) \sin \psi_0(t) \\ \dot{z}_{v0}(t) = g_0(t) \sin \varphi_0(t) \\ \dot{g}_0(t) = (g_{s0}(t) - g_0(t)) / u_{g0} \\ \dot{\varphi}_0(t) = (\varphi_{s0}(t) - \varphi_0(t)) / u_{\varphi0} \\ \dot{\psi}_0(t) = (\psi_{s0}(t) - \psi_0(t)) / u_{\psi0} \end{cases} \quad (2)$$

为便于协同控制器的设计,引入中间状态变量 $v_i(t)$,从而将跟随者无人机运动学模型等价改写为如下二阶积分形式:

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{p}}_i(t) = \boldsymbol{v}_i(t) \\ \dot{\boldsymbol{v}}_i(t) = \boldsymbol{u}_i(t) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\boldsymbol{v}_i(t) = [v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}]^T$ 为第 i 架跟随者无人机的速度向量, $\boldsymbol{u}_i(t) = [u_{xi}, u_{yi}, u_{zi}]^T$ 为其控制输入向量。

在此基础上, 定义增广状态向量 $\boldsymbol{x}_i(t) = [\boldsymbol{p}_i^T(t), \boldsymbol{v}_i^T(t)]^T$, 结合式(3), 可得其状态空间表达式:

$$\dot{\boldsymbol{x}}_i(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_i(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}_i(t) \quad (4)$$

其中, 系统矩阵 $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} 0 & \boldsymbol{I}_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, 输入矩阵 $\boldsymbol{B} =$

$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_3 \\ 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$, $\boldsymbol{I}_3 \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为三维单位矩阵。本文将领导者

无人机视为虚拟领导者, 其运动状态仅由自身动力学决定, 且不受外部控制输入作用, 故其运动学模型可表示为

$$\dot{\boldsymbol{x}}_0(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}_0(t) \quad (5)$$

其中, $\boldsymbol{x}_0(t) = [\boldsymbol{p}_0^T(t), \boldsymbol{v}_0^T(t)]^T$ 为领导者的增广状态向量, $\boldsymbol{v}_0(t) = [v_{x0}, v_{y0}, v_{z0}]^T$ 为其速度向量。

注 1 本文虽针对多无人机一致性跟踪问题展开研究, 但通过坐标变换 $\bar{\boldsymbol{p}}_i(t) = \boldsymbol{p}_i(t) - \boldsymbol{\Delta}_i$, 其中 $\boldsymbol{\Delta}_i = [\Delta_{xi}, \Delta_{yi}, \Delta_{zi}]^T$ 为期望编队偏差, 相关结论可直接推广至时变编队控制, 具有广泛的理论普适性。此外, 尽管所采用的二阶积分器动力学模型在形式上适用于多种线性系统, 但本文聚焦于开放通信环境与机载资源受限下的多无人机集群协同控制难题, 相较于大型航天器或地面网络化系统, 无人机集群面临的恶意攻击风险更为突出, 因此所提抗攻击量化策略对此类系统具有更强的针对性与应用价值。在工程实现方面, 该量化控制协议兼具低计算复杂度与低通信载荷优势, 可作为轻量化模块部署于机载嵌入式处理器, 在保障系统抗干扰鲁棒性的同时, 显著降低通信能耗。

1.4 DoS攻击模型与量化通信机制

所有无人机间的通信信道可能同时遭受 DoS 攻击而中断。如图 1 所示, 第 k 次 DoS 攻击区间为 $T_k = [\varepsilon_k, \varepsilon_k + \mu_k]$, 其中 ε_k 为攻击开始时刻, μ_k 为攻击持续时间。定义 $K_{[\eta_1, \eta_2]}$ 为时间区间 $[\eta_1, \eta_2]$ 内所有 DoS 攻击持续时间的并集, $H_{[\eta_1, \eta_2]}$ 则表示该时间区间内 DoS 攻击发生的总次数。对于任意采样时刻 t_k , 若 $t_k \notin K_{[0, +\infty)}$, 则信息可被成功接收; 若 $t_k \in K_{[0, +\infty)}$, 则通信信道被攻击阻断, 导致信息传输失败。根据文献[17], 分别从攻击持续时间和攻击发生频率两个方面对 DoS 攻击施加约束, 具体假设如下。

假设 1 对任意时间区间 $[\eta_1, \eta_2] \subset [0, +\infty)$, 存在常数 $\gamma_1 \geq 0$ 和 $\chi_1 \in (0, 1)$, 使得:

$$|K_{[\eta_1, \eta_2]}| \leq \gamma_1 + \chi_1(\eta_2 - \eta_1) \quad (6)$$

假设 2 对任意时间区间 $[\eta_1, \eta_2] \subset [0, +\infty)$, 存在常

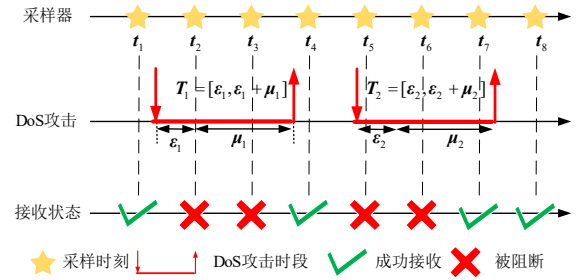


图 1 DoS攻击模型与采样机制示意图

Figure 1 Schematic diagram of the DoS attack model and sampling mechanism

数 $\gamma_2 \geq 0$ 和 $\chi_2 > 0$, 使得:

$$H(\eta_1, \eta_2) \leq \gamma_2 + \chi_2(\eta_2 - \eta_1) \quad (7)$$

基于上述 DoS 攻击模型及采样机制, 假设 1 从攻击持续时间的角度对 DoS 攻击行为施加约束, 要求在任意时间区间 $[\eta_1, \eta_2]$ 内所有攻击持续区间的总长度 $K_{[\eta_1, \eta_2]}$ 具有上界, 从而避免通信信道在较长时间内持续中断。假设 2 从攻击发生频率的角度对 DoS 攻击行为进行约束, 限制在任意时间区间内攻击发生的次数 $H_{[\eta_1, \eta_2]}$, 以排除在有限时间内攻击无限次发生的极端情形。因此, 假设 1 和假设 2 分别从攻击持续时间和攻击发生频率两个互补角度刻画了 DoS 攻击的统计特性, 而非对攻击的具体发生时刻或攻击模式做出确定性限制, 从而在保持攻击模型一般性的同时, 为后续系统稳定性证明提供必要的理论基础。

在上述 DoS 攻击模型下, 系统通信信道会在部分时段中断, 同时, 受实际通信带宽限制, 无人机间的信息交互需以离散时间信号的形式进行。为应对 DoS 攻击与带宽受限的双重约束, 本文采用一种基于周期采样的量化通信机制。具体而言, 信息在采样时刻 t_k 进行传输, 其中 $t_k = k\eta$, $\eta > 0$ 为固定的采样间隔。传输的信息需经由一个均匀量化器 $b: \mathbb{R} \rightarrow \{0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \theta\}$ 进行编码, 其表达式为

$$b(q) = \begin{cases} \theta, & q \geq \theta - \frac{1}{2} \\ c, & c - \frac{1}{2} \leq q < c + \frac{1}{2} \\ -b(-q), & q \leq -\frac{1}{2} \end{cases} \quad (8)$$

$c = 0, 1, \dots, \theta - 1$

其中: q 为待量化的连续实值信号; $\theta > 0$ 为量化器的量化阈值, 该量化器(8)的量化级数为 $2\theta + 1$ 。现有量化控制研究中常用的量化器包括均匀量化器和非均匀量化器。均匀量化器结构简单、量化间隔固定, 便于稳定性分析。非均匀量化器虽然能使系统达到渐近稳定, 但在收敛速度与稳态精度方面仍有待提

升。基于此,本文选取均匀量化器作为通信量化机制。当被量化信号超出量化器可表示范围时将引发饱和,从而产生不可控的量化误差并影响系统稳定性。为避免该问题,本文在后续控制协议中引入含自适应缩放因子的动态量化机制,并通过合理的参数设计保证量化信号始终处于非饱和和区间。

1.5 假设及相关引理

假设 3 假设多无人机系统的通信拓扑中含有一棵以领导者无人机为根节点的有向生成树。

假设 4 假设所有无人机的初始状态均有界,即存在正常数 G_0 ,使得 $\|x_i(0)\|_{\infty} \leq G_0$ 。

引理 1^[18] 定义矩阵 $L_B = L + B$ 。在假设 3 成立的条件下,存在正向量 $r = [r_1, r_2, \dots, r_n]^T$ 及其对应的对角矩阵 $R = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_n)$,使得:

$$\begin{aligned} (L_B)^T r &= I_n, \\ RL_B + (L_B)^T R &> 0 \end{aligned} \quad (9)$$

引理 2^[19] 在假设 1 和假设 2 成立的条件下,若满足 $\chi_1 + \chi_2 \eta < 1$,则在对于任意时间区间 $[t_k, t_{k+\alpha})$,成功传输次数 $T_{[t_k, t_{k+\alpha})}^S$ 满足:

$$T_{[t_k, t_{k+\alpha})}^S \geq (1 - \chi_1 - \chi_2 \eta) \alpha - \left(\frac{\gamma_1}{\eta} + \gamma_2 \right) \quad (10)$$

同时,失败传输次数 $T_{[t_k, t_{k+\alpha})}^U$ 满足:

$$T_{[t_k, t_{k+\alpha})}^U \leq \left(\frac{\gamma_1}{\eta} + \gamma_2 \right) + (\chi_1 + \chi_2 \eta) \alpha \quad (11)$$

其中, $t_{k+\alpha}$ 为第 $k+\alpha$ 个采样时刻, α 为正整数,满足 $t_{k+\alpha} > t_k$ 。

本研究致力于解决 DoS 攻击下和通信带宽约束下的多无人机分布式一致性跟踪问题。针对多无人机系统,本文旨在设计一种基于采样的分布式量化控制协议,以确保所有跟随者在遭受 DoS 攻击时仍能精确跟踪领导者的位置,最终实现系统的一致性位置协同控制,即满足如下一致性条件:

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} \|x_i(t) - x_0(t)\| = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

此外,所设计的量化控制协议需进行合理参数配置,以确保在每次信息传输时,量化器(8)均能保持非饱和状态,从而保证通信机制的有效性。

2 主要内容

本节针对第 1 节所建立的系统,研究其在通信带宽受限和 DoS 攻击双重约束下的一致性跟踪问题。为此,基于多无人机系统模型、DoS 攻击模型和量化通信机制,设计了一种基于采样的分布式量化控制协议,并给出了严格的理论分析与证明。

2.1 量化控制协议设计

定义 $\hat{x}_i(t_k)$ 为 $x_i(t)$ 在采样时刻 t_k 的估计值。对于

$t \in [t_k, t_{k+1})$,设计如下基于采样的分布式量化控制协议:

$$u_i(t) = \begin{cases} W\phi_i(t_k), & t_k \notin K_{[0, +\infty)} \\ 0, & t_k \in K_{[0, +\infty)} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $W \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$ 为待设计的控制增益矩阵, ϕ_i 定义为 $\phi_i(t_k) = [a_{ij}(\hat{x}_j(t_k) - \hat{x}_i(t_k)) + b_i(\hat{x}_0(t_k) - \hat{x}_i(t_k))]$, 进一步,为第 i 架无人机设计如下状态估计器:

$$\begin{cases} \hat{x}_i(0) = 0_6 \\ \hat{x}_i(t_k) = \sigma^{A\eta} \hat{x}_i(t_{k-1}) + h(t_k) \omega_i(t_k), t_k \notin K_{[0, +\infty)} \\ \hat{x}_i(t_k) = \sigma^{A\eta} \hat{x}_i(t_{k-1}), t_k \in K_{[0, +\infty)} \end{cases} \quad (14)$$

其中,当通信网络未受 DoS 攻击时,状态估计器利用接收到的量化状态信息进行更新,当通信受 DoS 攻击而被阻断时,估计器仅依赖系统动力学模型进行更新。此外,缩放函数 $h: [0, +\infty) \rightarrow \mathbb{R}^+$ 的更新规律定义为

$$h(t_k) = \begin{cases} \varpi_1 h(t_{k-1}), t_k \notin K_{[0, +\infty)} \\ \varpi_2 h(t_{k-1}), t_k \in K_{[0, +\infty)} \\ h(t_0) = h_0 \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\varpi_1 > 0$ 和 $\varpi_2 > 0$ 为自适应缩放因子, $\omega_i(t_k) \in \mathbb{R}^6$ 是无人机 i 在采样时刻 t_k 生成的量化信号,用于无人机之间的信息传输,其具体定义为

$$\omega_i(t_k) = F \left(\frac{x_i(t_k) - \sigma^{A\eta} \hat{x}_i(t_{k-1})}{h(t_k)} \right), t_k \notin K_{[0, +\infty)} \quad (16)$$

其中,对于向量 $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$,定义 $F(\cdot) = [f(y_1), f(y_2), \dots, f(y_n)]^T$, $f(y_i)$ 为作用于每个标量分量的均匀量化器。量化信号 $\omega_i(t_k)$ 仅在 $t_k \notin K_{[0, +\infty)}$,即通信信道未被攻击阻断时,参与状态估计的更新。

所设计的控制协议与状态估计机制,使得无人机之间仅需传输有限比特的量化信息。这显著降低了通信负载,从而满足了严格的通信带宽约束。

2.2 稳定性证明

本节旨在分析在 DoS 攻击和通信带宽约束下,所提闭环系统稳定性。首先,结合系统模型与控制协议构造全局跟踪误差动力学模型。其次,针对通信正常与受 DoS 攻击阻断两种情形,分别分析系统跟踪误差的动态特性。最后,基于 DoS 攻击持续时间和发生频率的统计特性约束,给出系统实现一致性跟踪以及量化器不发生饱和的充分条件。定义第 i 个跟随者无人机与领导者之间的跟踪误差为 $\sigma_i(t) = x_i(t) - x_0(t)$,结合式(4)和式(13),可得:

$$\dot{\sigma}(t) = \begin{cases} I_n \otimes A - L_B \otimes BW \sigma(t) \\ + (L_B \otimes BW) \rho(t), t_k \notin K_{[0, +\infty)} \\ (I_n A) \sigma(t), t_k \in K_{[0, +\infty)} \end{cases} \quad (17)$$

其中, $\sigma(t) = [\sigma_1^T(t), \sigma_2^T(t), \dots, \sigma_n^T(t)]^T$ 为全局跟踪误差向量, $\rho(t) = \sigma(t) - \zeta(t_k)$ 。在采样时刻 t_k , 定义辅助向量 $\zeta(t_k) = [\zeta_1^T(t_k), \zeta_2^T(t_k), \dots, \zeta_n^T(t_k)]^T$, 其中 $\zeta_i(t_k) = \hat{x}_i(t_k) - x_0(t_k)$ 。同上, 令 $\rho(t_k) = x(t_k) - \hat{x}(t_k)$ 与 $x(t_k) = [x_1^T(t_k), x_2^T(t_k), \dots, x_n^T(t_k)]^T$ 分别表示全局真实状态与估计状态的堆叠向量, 则有 $\hat{x}(t_k) = [\hat{x}_1^T(t_k), \hat{x}_2^T(t_k), \dots, \hat{x}_n^T(t_k)]^T$ 。

为分析所构建闭环系统的稳定性, 给出如下定理。

定理 1 对于时间区间 $t \in [t_k, t_{k+1})$ 内, 若采样时刻 $t_k \notin K_{[0, +\infty)}$ 且采样间隔 η 满足:

$$\eta < \frac{1}{\|A\|} \ln \left(1 + \frac{\|A\|}{\|I_n \otimes A - L_B \otimes BW\|} \right) \quad (18)$$

则存在正常数 σ_1 和 σ_2 , 使得对任意 $t \in [t_k, t_{k+1})$, 可得:

$$\|\rho(t)\|^2 \leq \delta_1 \|\rho(t_k)\|^2 + \delta_2 \|\sigma(t)\|^2 \quad (19)$$

其中, $\delta_1 = \frac{2\sigma^{2\|A\|\eta}}{(1-z_1)^2}$, $\delta_2 = \frac{2z_1^2}{(1-z_1)^2}$, 且 $z_1 = \|I_n \otimes A - L_B \otimes$

$$BW\| \left\| \int_{t_k}^t \sigma^{A(t-s)} ds \right\|。$$

证明 当 $t_k \notin K_{[0, +\infty)}$ 时, 由式(17)可知, 对任意 $t \in (t_k, t_{k+1})$, 有:

$$\dot{\rho}(t) = (I_n \otimes A)\rho(t) + (I_n \otimes A - L_B \otimes BW)\zeta(t_k) \quad (20)$$

可得:

$$\|\rho(t)\| \leq \sigma^{\|A\|(t-t_k)} \|\rho(t_k)\| + z_1 \|\zeta(t_k)\| \quad (21)$$

注意到 $\sigma^{\|A\|(t-t_k)} \leq \sigma^{\|A\|\eta}$ 且 $\zeta(t_k) = \sigma(t) - \rho(t)$, 由式(19)可得:

$$\|\rho(t)\| \leq \sigma^{\|A\|\eta} \|\rho(t_k)\| + z_1 (\|\rho(t)\| + \|\sigma(t)\|) \quad (22)$$

当 $\eta < \frac{1}{\|A\|} \ln \left(1 + \frac{\|A\|}{\|I_n \otimes A - L_B \otimes BW\|} \right)$, 且 $1 -$

$z_1 > 0$, 可得:

$$\|\rho(t)\| \leq \frac{\sigma^{\|A\|\eta}}{1-z_1} \|\rho(t_k)\| + \frac{z_1}{1-z_1} \|\sigma(t)\| \quad (23)$$

上述定理 1 在 DoS 攻击条件下给出了系统估计误差的上界, 该结果为后续定理 2 中跟踪一致性与量化器不饱和性的证明提供必要条件。证毕

在定理 1 给出的系统估计误差上界基础上, 进一步引入动态量化机制与自适应缩放因子, 得到如下结果。

定理 2 在假设 1~4 成立的条件下, 且满足以下条件: (1) 控制增益矩阵设计为 $W = lB^T Y^{-1}$, 其中 $l \geq$

$\frac{w_0 \lambda_m(R)}{\lambda^*}$ 和 $\lambda_* = \lambda_m((L_B)^T R + RL_B)$, 且存在正常数 w_0 ,

$\beta_1 > 0, \beta_2 > 0$, 以及 $Y > 0$, 满足以下矩阵不等式:

$$\begin{aligned} YA^T + AY - w_0 BB^T &< -\beta_1 Y \\ YA^T + AY &< \beta_2 Y \end{aligned} \quad (24)$$

(2) 采样周期满足:

$$\eta < \frac{1}{\|A\|} \ln \left(1 + \frac{\|A\|}{\|I_n \otimes A - L_B \otimes BW\|} \right) \quad (25)$$

(3) 量化器参数满足:

$$\begin{cases} h_0 \geq \max \left\{ 2G_0, \frac{\theta}{\omega_1 G_0}, \frac{\sqrt{E_1}}{12G_0 n \lambda_M(R \otimes Y^{-1})} \right\} \\ \varpi_1 \in (\sigma^{-\psi_1 \frac{1}{2}\eta}, I) \\ \varpi_2 \geq \max \{ \|\sigma^{A\eta}\|, \sigma^{\beta_2 \eta} \} \\ \theta \geq \psi_2 - \frac{1}{2} \end{cases} \quad (26)$$

其中, $\psi_1 > 0, E_1$ 将在式(45)给出。

(4) DoS 攻击模型参数满足:

$$\chi_1 + \chi_2 \eta < \frac{-\ln \varpi_1}{\ln \varpi_2 - \ln \varpi_1} \quad (27)$$

由此可见, 在所提量化控制协议(13)的调节下, 多无人机系统能够在遭受 DoS 攻击时仍能实现一致性跟踪, 且量化器(16)在全过程中始终处于非饱和状态。

证明 构造如下 Lyapunov 函数:

$$V(t) = \sigma^T(t)(R \otimes Y^{-1})\sigma(t) \quad (28)$$

对于任意 $t \in [t_k, t_{k+1})$, 根据采样时刻 t_k 是否处于 DoS 攻击区间内(即 t_k 是否属于集合 $K_{[0, +\infty)}$), 分为以下两种情形进行讨论。

情形 1 当 $t \in K_{[0, +\infty)}$ 时, 对式(21)求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sigma^T(t)(R \otimes AY^{-1})\sigma(t) + \sigma^T(t)(R \otimes Y^{-1}A)\sigma(t) \\ &= \sigma^T(t)(R \otimes (AY^{-1} + Y^{-1}A))\sigma(t) \\ &= \beta_2 \sigma^T(t)(R \otimes Y^{-1})\sigma(t) \\ &= \beta_2 V(t) \end{aligned} \quad (29)$$

根据以上推导, 可得:

$$V(t) \leq \sigma^{\beta_2(t-t_k)} V(t_k), t_k \in K_{[0, +\infty)} \quad (30)$$

定义辅助变量 $A(t_k) = \frac{V(t_k)}{h^2(t_k)}$, 结合式(22), 可得:

$$A(t_k) = \frac{\sigma^{\beta_2 \eta} V(t_{k-1})}{\varpi_2^2 h^2(t_{k-1})} \leq \frac{V(t_{k-1})}{h^2(t_{k-1})} = A(t_{k-1}) \quad (31)$$

情形 2 当 $t \notin K_{[0,+\infty)}$ 时, 对式(21)求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \dot{\sigma}^T(t) (\mathbf{R} \otimes \mathbf{Y}^{-1}) \sigma(t) + \sigma^T(t) (\mathbf{R} \otimes \mathbf{Y}^{-1}) \dot{\sigma}(t) \\ &\leq \sigma^T(t) (\mathbf{R} \otimes (\mathbf{A}^T \mathbf{Y}^{-1} + \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{A})) \sigma(t) \\ &\quad - l \sigma^T(t) \left((\mathbf{L}_B^T \mathbf{R} + \mathbf{R} \mathbf{L}_B) \otimes (\mathbf{Y}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{B}^T \mathbf{Y}^{-1}) \right) \sigma(t) \\ &\quad + 2\lambda^* \|\mathbf{Y}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{W}\| \|\rho(t)\| \|\sigma(t)\| \\ &\leq \sigma^T(t) (\mathbf{R} \otimes (\mathbf{A}^T \mathbf{Y}^{-1} + \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{A} - w_0 \mathbf{Y}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{B}^T \mathbf{Y}^{-1})) \sigma(t) \\ &\quad + 2\lambda^* \|\mathbf{Y}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{W}\| \|\rho(t)\| \|\sigma(t)\| \\ &\leq -\beta_1 V(t) + 2\lambda^* \|\mathbf{Y}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{W}\| \|\rho(t)\| \|\sigma(t)\| \\ &\leq -\frac{\beta_1}{2} V(t) + z_2 \|\rho(t)\|^2 \end{aligned} \quad (32)$$

$$\text{其中, } \lambda^* = \lambda_M (\mathbf{L}_B^T \mathbf{R} + \mathbf{R} \mathbf{L}_B), z_2 = \frac{8(\lambda^*)^2}{\beta_1 \lambda_m (\mathbf{R} \otimes \mathbf{Y}^{-1})}.$$

结合定理 1 的结论, 可得:

$$\dot{V}(t) \leq -\psi_1 V(t) + z_2 \delta_1 \|\rho(t_k)\|^2 \quad (33)$$

$$\text{其中, } \psi_1 = \left(\frac{\beta_1}{2} - \frac{z_2 \delta_2}{\lambda_m (\mathbf{R} \otimes \mathbf{Y}^{-1})} \right).$$

由上式可得:

$$V(t) \leq \sigma^{\psi_1(t-t_k)} V(t_k) + \psi_2 \|\rho(t_k)\|^2 \quad (34)$$

$$\text{其中, } \psi_2 = z_1 \delta_1 \left\| \int_{t_k}^t \sigma^{-\psi_1(t-s)} ds \right\|.$$

结合式(31)与 $\Lambda(t_k)$ 的定义, 可得:

$$\begin{aligned} \Lambda(t_k) &= \frac{\sigma^{-\psi_1 \eta} V(t_{k-1}) + \psi_2 \|\rho(t_{k-1})\|^2}{\varpi_1^2 h^2(t_{k-1})} \\ &\leq \frac{\sigma^{-\psi_1 \eta} V(t_{k-1})}{\varpi_1^2 h^2(t_{k-1})} + \frac{\psi_2 \|\rho(t_{k-1})\|^2}{\varpi_1^2 h^2(t_{k-1})} \\ &= \frac{\sigma^{-\psi_1 \eta} \Lambda(t_{k-1})}{\varpi_1^2} + \frac{\psi_2 \|\rho(t_{k-1})\|^2}{\varpi_1^2 h^2(t_{k-1})} \end{aligned} \quad (35)$$

在上述分析的基础上, 以下将证明 $\lim_{k \rightarrow +\infty} V(t_k) = 0$, 并证明量化器(16)在整个控制过程中始终保持非饱和状态。

由假设 3 可知, 系统初始状态满足 $\|\mathbf{x}_i(0)\|_\infty \leq G_0$, 故初始估计误差满足:

$$\|\rho(0)\|_\infty = \|\mathbf{x}(0) - \hat{\mathbf{x}}(0)\|_\infty \leq G_0 \leq \frac{1}{2} h_0 \quad (36)$$

若 $t_1 \notin K_{[0,+\infty)}$, 则有:

$$\frac{\|\mathbf{x}_i(t_1) - \sigma^{A\eta} \hat{\mathbf{x}}_i(0)\|_\infty}{\varpi_1 h(t_1)} \leq \frac{G_0}{\varpi_1 h_0} \leq \theta \quad (37)$$

根据量化器(16)的定义, 其量化误差满足

$$\left\| \varpi_i(t_1) - \frac{\mathbf{x}_i(t_1) - \sigma^{A\eta} \hat{\mathbf{x}}_i(0)}{h(t_1)} \right\|_\infty \leq \frac{1}{2}. \text{ 结合状态估计器更新}$$

式(14), 可进一步推得 $\|\rho(t_1)\|_\infty \leq \frac{1}{2} h(t_1)$ 。若 $t_1 \in K_{[0,+\infty)}$, 则因通信被 DoS 攻击阻断, 状态估计器按式(14)更新, 此时估计误差满足:

$$\|\rho(t_1)\|_\infty = \left\| (\mathbf{I}_n \otimes \sigma^{A\eta}) \rho(0) \right\|_\infty \leq \frac{1}{2} \varpi_2 h_0 = \frac{1}{2} h(t_1) \quad (38)$$

进一步地, 考虑 $t_k \in K_{[0,+\infty)}$ 的情形。若 $\|\rho(t_{k-1})\| \leq \frac{\sqrt{6n}}{2} h(t_{k-1})$ 时, 则有:

$$\|\rho(t_k)\| = \left\| (\mathbf{I}_n \otimes \sigma^{A\eta}) \rho(t_{k-1}) \right\| \leq \frac{\sqrt{6n}}{2} h(t_k) \quad (39)$$

若 $t_k \notin K_{[0,+\infty)}$ 时, 则有:

$$\mathbf{x}_i(t_k) = \sigma^{A\eta} \mathbf{x}_i(t_{k-1}) + \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{u}_i(t_{k-1}) \quad (40)$$

其中, $\mathbf{P} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \sigma^{A(t_k-s)} ds$ 。由此可得:

$$\left\| \frac{\mathbf{x}_i(t_1) - \sigma^{A\eta} \hat{\mathbf{x}}_i(0)}{h(t_1)} \right\|_\infty \leq \frac{\|\sigma^{A\eta} \rho_i(t_{k-1})\|_\infty}{\varpi_1 h(t_{k-1})} + \frac{\|\mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{u}_i(t_{k-1})\|_\infty}{\varpi_1 h(t_{k-1})} \quad (41)$$

若 $\|\rho(t_{k-1})\|_\infty \leq \frac{1}{2} h(t_{k-1})$, 可得:

$$\frac{\|\sigma^{A\eta} \rho_i(t_{k-1})\|_\infty}{\varpi_1 h(t_{k-1})} \leq \frac{\|\sigma^{A\eta}\|_\infty}{2\varpi_1} \quad (42)$$

注意到:

$$\begin{aligned} &\frac{\|\mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{u}_i(t_{k-1})\|_\infty}{\varpi_1 h(t_{k-1})} \\ &\leq \frac{\left\| \int_{t_{k-1}}^{t_k} \sigma^{A(t_k-s)} ds \mathbf{B} \mathbf{W} \right\|_\infty \left(\|\sigma(t_{k-1})\|_\infty + \|\rho(t_{k-1})\|_\infty \right)}{\varpi_1 h(t_{k-1})} \\ &\leq \frac{\|\mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{W}\|_\infty}{\varpi_1} \left(\sqrt{\frac{\Lambda(t_{k-1})}{\lambda_m (\mathbf{R} \otimes \mathbf{Y}^{-1})}} + \frac{1}{2} \right) \end{aligned} \quad (43)$$

由式(32)可知:

$$\Lambda(t_k) \leq \frac{\sigma^{-\psi_1 \eta}}{\varpi_1^2} \Lambda(t_{k-1}) + \frac{3n\psi_2}{2\varpi_1^2} \quad (44)$$

考虑初始值 $\Lambda(0) \leq \frac{24G_0^2 n \lambda_M^2 (\mathbf{R} \otimes \mathbf{Y}^{-1})}{h_0^2} \leq E_1$, 且在情形 1 中有 $\Lambda(t_k) \leq \Lambda(t_{k-1})$, 则有:

$$E_1 = \frac{3n\psi_2}{2(\varpi_1^2 - \sigma^{-\psi_1 \eta})} \quad (45)$$

因此, 对于任意 $k = 0, 1, \dots$, 均有 $\Lambda(t_k) \leq E_1$, 进一步可得:

$$\left\| \frac{\mathbf{x}_i(t_1) - \sigma^{A\eta} \hat{\mathbf{x}}_i(0)}{h(t_1)} \right\|_\infty \leq E_2 \quad (46)$$

其中, $E_2 = \frac{\|\sigma^{A\eta}\|_\infty}{2\varpi_1} + \frac{\|\mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{W}\|_\infty}{\varpi_1} \left(\sqrt{\frac{E_1}{\lambda_m (\mathbf{R} \otimes \mathbf{Y}^{-1})}} + \frac{1}{2} \right)$ 。

根据量化器(16)的定义,为保证其在控制过程中始终处于非饱和状态,需满足 $\theta \geq E_2 - 1/2$ 。在时间 $[t_k, t_{k+\alpha})$ 内,缩放函数满足:

$$h(t_{k+\alpha}) = h(t_k) \varpi_1^{T_{E_2}^S(t_{k+\alpha})} \varpi_1^{T_{E_2}^U(t_{k+\alpha})} \quad (47)$$

其中, $t_{k+\alpha}$ 和 t_k 为采样时刻,且 $t_{k+\alpha} > t_k$ 。结合引理2,可得:

$$\begin{aligned} \varpi_1^{T_{E_2}^S(t_{k+\alpha})} \varpi_1^{T_{E_2}^U(t_{k+\alpha})} &\leq \left(\frac{\varpi_2}{\varpi_1}\right)^{\gamma_1 + \gamma_2} (\varpi_1^{1-\chi_1-\chi_2\eta} \varpi_2^{\chi_1+\chi_2\eta})^\alpha \\ &= \left(\frac{\varpi_2}{\varpi_1}\right)^{\gamma_1 + \gamma_2} \varpi^\alpha \end{aligned} \quad (48)$$

其中, $\varpi = \varpi_1^{1-\chi_1-\chi_2\eta} \varpi_2^{\chi_1+\chi_2\eta}$ 。由定理2条件(4)可知,DoS攻击模型参数满足给定约束条件,进而保证所构造的自适应缩放因子满足 $\varpi < 1$,则有:

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} h(t_k) \leq \lim_{\alpha \rightarrow +\infty} h_0 \left(\frac{\varpi_2}{\varpi_1}\right)^{\gamma_1 + \gamma_2} \varpi^\alpha = 0 \quad (49)$$

进一步,结合 $A(t_k)$ 的有界性,可得:

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} V(t_k) \leq \lim_{k \rightarrow +\infty} h^2(t_k) A(t_k) = 0 \quad (50)$$

综上所述,在满足定理2所述条件时,多无人机系统在量化控制协议的调节下,能够在DoS攻击和通信带宽约束下实现一致性跟踪。证毕

注2 定理2中条件(1)通过求解线性矩阵不等式确定控制增益矩阵,为控制协议的设计提供了理论依据。条件(2)确立了采样间隔 η 的上界约束。尽管减小采样间隔有助于系统逼近连续时间特性、提升控制性能,但也会加剧通信负载。条件(3)给出了量化机制中参数的选取原则,其中自适应缩放因子 ϖ_1 和 ϖ_2 的取值影响缩放函数的收敛性,进而影响系统的收敛速度。同时,自适应缩放因子的选取受采样间隔 η 的制约,因此在实际应用中需权衡采样频率与量化参数。条件(4)揭示了量化机制与系统抗DoS攻击能力间的制约关系,其中 ϖ_1 和 ϖ_2 与所采用的量化机制相关,而 γ_1 和 γ_2 表征DoS攻击的统计特性。分析表明, $-\ln \varpi_1 / (\ln \varpi_2 - \ln \varpi_1)$ 的取值越小,系统抵御DoS攻击的能力越弱。

3 数值仿真

为验证所设计的分布式量化控制协议(13)在DoS攻击下的一致性跟踪控制性能,本节对一个由1架领导者无人机和4架跟随者无人机组成的多无人机系统进行数值仿真,其通信拓扑结构如图2所示。

在仿真中,领导者无人机的初始状态分别设置为 $\mathbf{p}_0(t) = [9, 14, 16]^T$, $\mathbf{v}_0(t) = [2, -2, 3]^T$, 4架跟随者无人机的初始状态分别设置为 $\mathbf{p}_1(t) = [-3, 5, 5]^T$, $\mathbf{p}_2(t) = [-2.5, -3, 6]^T$, $\mathbf{p}_3(t) = [-2, -3, 5]^T$, $\mathbf{p}_4(t) = [-2.5, 3, 7]^T$, $\mathbf{v}_1(t) = [1.5, 1, 2]^T$, $\mathbf{v}_2(t) = [2, 0.7, 1]^T$, $\mathbf{v}_3(t) = [1.6, 0.6, 0.9]^T$, $\mathbf{v}_4(t) =$

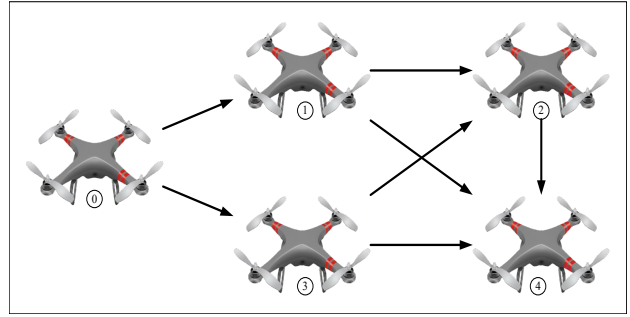


图2 多无人机通信拓扑图

Figure 2 Communication graph of the multi-UAV system

$[0.6, 1.5, 2]^T$ 。根据定理2,可计算得到参数 $l = 21$, $w_0 = 40$, $\beta_1 = 1$, $\beta_2 = 2.5$, 以及矩阵:

$$Y = \begin{bmatrix} 4.67 & 4.75 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 4.75 & 28.56 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.67 & 4.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.75 & 28.56 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.67 & 4.75 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 4.75 & 28.56 \end{bmatrix},$$

$$W = I_3 \otimes [4.5136 \quad -0.0169].$$

自适应缩放函数(15)的参数选取为 $h_0 = 30$, $\varpi_1 = 0.96$ 和 $\varpi_2 = 1.5$ 。基于此,计算可得 $-\ln \varpi_1 / (\ln \varpi_2 - \ln \varpi_1) = 0.0915$ 。设定DoS攻击模型参数 $\gamma_1 = \gamma_2 = 1$, $\chi_1 = 0.08$, $\chi_2 = 0.09$, 以及采样间隔 $\eta = 0.02$ 。代入计算可得 $\chi_1 + \chi_2\eta = 0.0818 < 0.0915$, 满足定理2中的约束条件。

在量化控制协议(13)的作用下,多无人机系统的数值仿真结果如图3~6所示。如图3所示,各无人机的位置跟踪误差在初始阶段波动后,在 $t = 3$ s附近逐渐收敛至0,验证了所设计的量化机制能有效抵抗DoS攻击。图4给出了速度一致性误差曲线,即使在DoS攻击导致通信中断期间,误差仍能保持收敛趋势并最终趋于一致,体现了系统的鲁棒性。图5展示了控制输入曲线,在DoS攻击期间,控制输入在控制协议调节下呈现分段特性:通信中断时,控制律依据协议动态调整以维持系统稳定;系统趋于一致后,控制输入逐渐平滑并趋于稳定,从而减少不必要的控制更新与通信资源消耗。此外,图6给出了缩放函数 $h(t)$ 的动态变化曲线。可以看出, $h(t)$ 在整个过程中保持有界并最终收敛于0,表明量化精度能够随跟踪误差自适应提高,同时保证了量化器始终工作于非饱和区。需要指出,量化器将连续信号离散化虽能降低传输频率,但可能引入控制输入的高频抖动,其幅值与采样间隔 η 及自适应缩放因子 ϖ_1 、 ϖ_2 的选取紧密相关。

为验证所提控制方法在DoS攻击与有限带宽双重约束下的优势,本文与两类现有方法进行对比:一是未考虑DoS攻击的控制方法;二是考虑了DoS攻击的量化控制方法。在与未考虑DoS攻击的控制方法

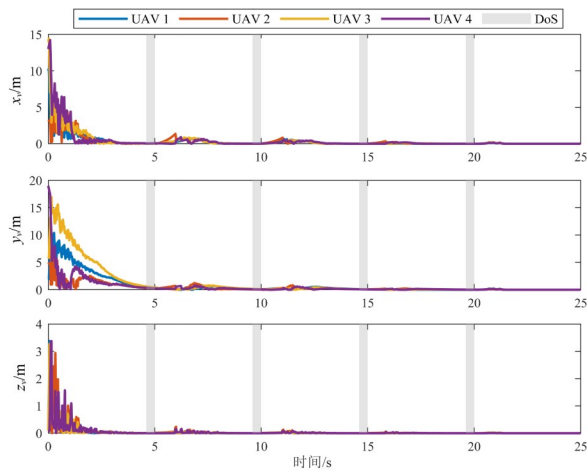


图3 DoS攻击下多无人机位置跟踪误差曲线

Figure 3 Position tracking error curves of the multi-UAV system under DoS attacks

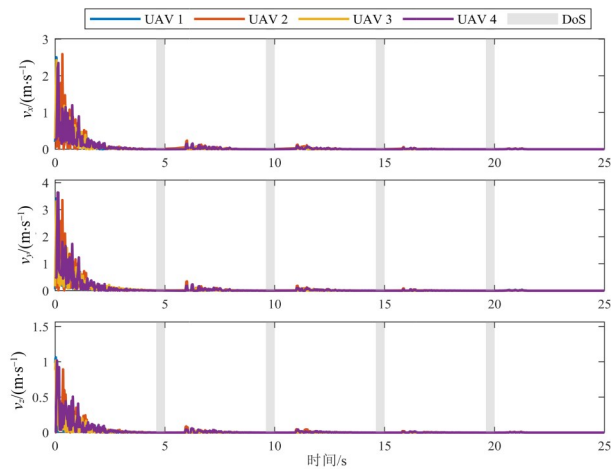


图4 DoS攻击下多无人机速度跟踪误差曲线

Figure 4 Velocity tracking error curves of the multi-UAV system under DoS attacks

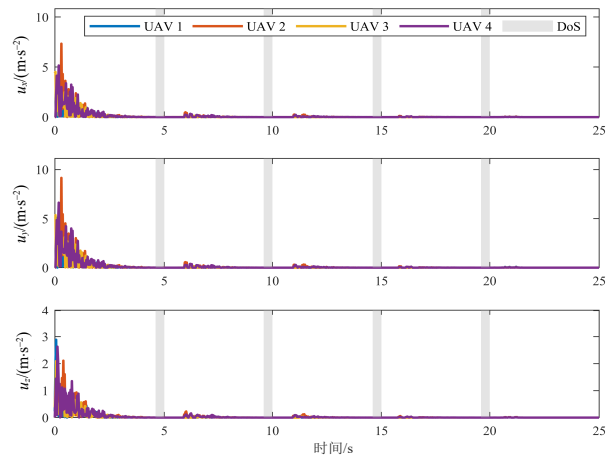


图5 各跟随者无人机控制输入响应曲线

Figure 5 Control input response curves of the follower UAVs

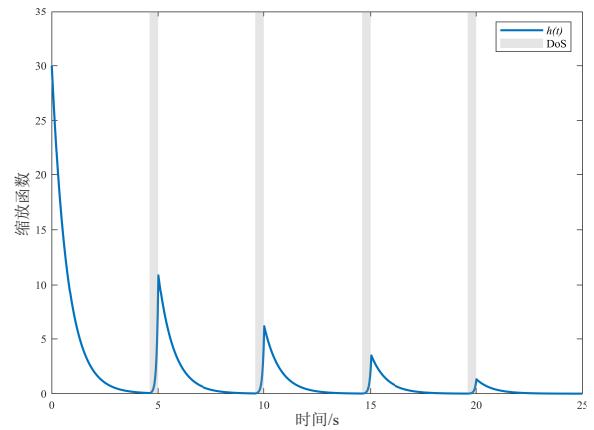


图6 DoS攻击下缩放函数的动态变化曲线

Figure 6 Dynamic evolution of the scaling function under DoS attacks

对比时,采用相同的DoS攻击环境与无人机参数。如图7所示,采用文献[20]的控制器时,无人机的位置跟踪误差出现偏差。具体而言,当通信通道受DoS攻击时,该控制器将导致位置跟踪误差发散。相比之下,采用本文控制协议时,其位置跟踪误差能够收敛至0(见图3)。在与考虑DoS攻击的量化控制方法对比时,采用相同的DoS攻击环境、通信带宽及无人机参数。图8与图9呈现了与文献[21]中量化机制的对比结果。在相同条件下,如图8(a)所示,在通信带宽约束下,文献[21]量化机制下的量化误差变得无界。相反,如图8(b)所示,在相同带宽约束下,本文所设计量化机制下的量化误差始终有界,证明了量化器未饱和。如图9(a)所示,文献[21]机制下的多无人机跟踪误差在带宽约束下发散;而如图9(b)所示,本文机制在相同约束下能使一致性误差收敛至0。

综上所述,仿真结果充分验证了所提量化控制协

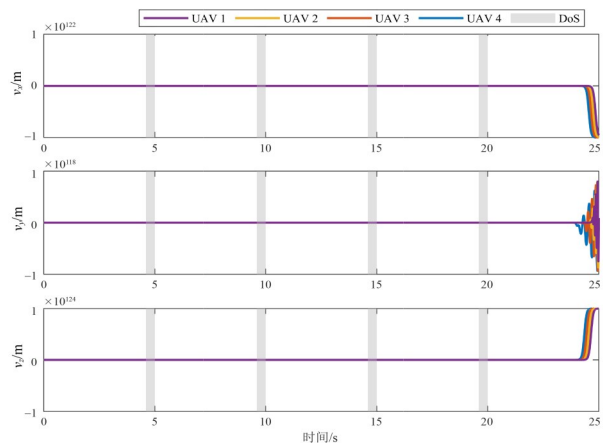
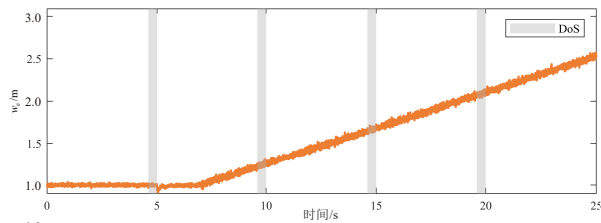
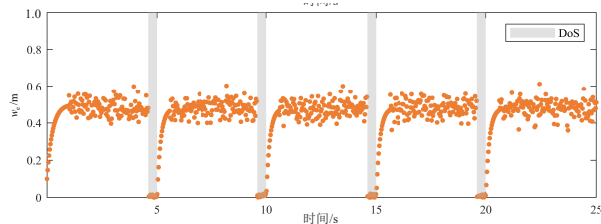


Figure 7 Position tracking error curves of the multi-UAV system under DoS attacks using the method in reference [20]



(a) 文献[21]量化机制下的量化误差

(a) Quantization errors under the quantization mechanism in reference [21]

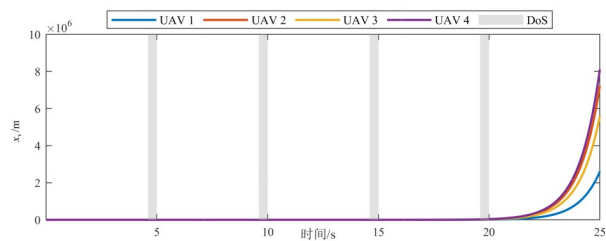


(b) 本文量化机制下的量化误差

(b) Quantization errors under the proposed quantization mechanism

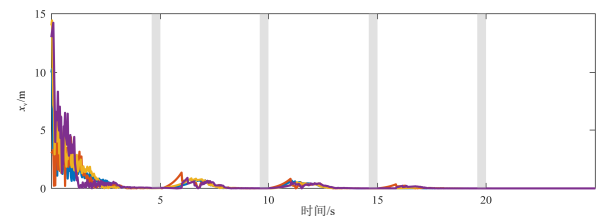
图8 本文方法与文献[21]方法的量化误差对比

Figure 8 Comparison of the quantization errors between the proposed method and the method in reference [21]



(a) 文献[21]量化机制下的位置跟踪误差

(a) Position tracking errors under the quantization mechanism in reference [21]



(b) 本文量化机制下的位置跟踪误差

(b) Position tracking errors under the proposed quantization mechanism

图9 本文量化机制与文献[21]量化机制下的多无人机位置跟踪误差对比

Figure 9 Comparison of multi-UAV position tracking errors under the proposed quantization mechanism and the quantization mechanism in reference [21]

议(13)的有效性:在 DoS 攻击下,系统能实现一致性跟踪,同时避免量化器饱和。这印证了定理2理论分析的正确性,也表明了该控制协议在保障多无人机系统安全、精准协同方面的优势。

4 结束语

本文研究了 DoS 攻击下多无人机系统的一致性跟踪控制问题,提出一种基于采样的分布式量化控制方法。针对领导者-跟随者多无人机系统,同时考虑 DoS 攻击与通信带宽受限的双重约束,设计了基于采样的分布式动态量化控制协议。通过合理设计采样周期、控制增益及量化参数,在 DoS 攻击持续时间和频率满足给定上界的条件下,证明了系统能够实现一致性跟踪,并揭示了量化参数、采样间隔与系统抗攻击能力之间的内在关系。仿真结果表明,在 DoS 攻击和通信带宽约束下,所有跟随无人机的位置与速度状态均能渐近跟踪领导者;控制输入在通信中断时呈现合理的分段特性;动态缩放函数始终保持有界并收敛至 0,从而保证了量化器不饱和,实现了通信资源的高效利用。综上,本文所提出的分布式量化控制协议能有效保障多无人机系统在 DoS 攻击下的一致性跟踪性能。未来工作可拓展至异步 DoS 攻击及更复杂通信拓扑下的量化一致性控制问题研究。

致谢 感谢赵丹博士给本文提出的参考意见。

参考文献

[1] 江碧涛,温广辉,周佳玲,等. 智能无人集群系统跨域协同技术研究现状与展望[J]. 中国工程科学, 2024, 26(1): 117-126.
Jiang Bitao, Wen Guanghui, Zhou Jialing, et al. Cross-domain cooperative technology of intelligent unmanned swarm systems: Current status and prospects[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(1): 117-126. (in Chinese)

[2] 任双,周洁,高嵩,等. 基于注意力机制的无人机集群协同分群控制算法[J]. 电子学报, 2023, 51(7): 1898-1905.
Ren Shuang, Zhou Jie, Gao Song, et al. Cooperative fission control algorithm of UAV swarm based on attention mechanism[J]. Acta Electronica Sinica, 2023, 51(7): 1898-1905. (in Chinese)

[3] 李壮举,杜朋达,王宁. 基于改进 LESO 的四旋翼无人机模糊线性自抗扰控制方法[J]. 电子学报, 2024, 52(9): 3185-3194.
Li Zhuangju, Du Pengda, Wang Ning. Fuzzy linear active disturbance rejection control of a quadrotor UAV via an improved LESO[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(9): 3185-3194. (in Chinese)

[4] 赵丹,温广辉. 面向合谋攻击的多智能体系统弹性一致性控制[J]. 指挥与控制学报, 2023, 9(6): 734-741.
Zhao Dan, Wen Guanghui. Resilient consensus control for multi-agent systems against collusive attacks[J]. Journal of Command and Control, 2023, 9(6): 734-741. (in Chinese)

[5] 吴忠强,程洪强. 网络攻击下考虑状态受限的微电网安

全运行与控制[J]. 电子学报, 2024, 52(9): 3240-3250.

Wu Zhongqiang, Cheng Hongqiang. Safe operation and control of microgrid considering state constraints under network attacks[J]. Acta Electronica Sinica, 2024, 52(9): 3240-3250. (in Chinese)

- [6] Ma Ji, Chen Xiangyong, Wen Guanghui, et al. Dynamic memory event-triggered lag consensus of multi-UAV systems with hybrid attacks over stochastic switching topology[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2025, 22: 16999-17009.
- [7] Wen Guanghui, Wang Peijun, Lyu Yuezu, et al. Secure consensus of multi-agent systems under denial-of-service attacks[J]. Asian Journal of Control, 2023, 25(2): 695-709.
- [8] Lu Anyang, Yang Guanghong. Input-to-state stabilizing control for cyber-physical systems with multiple transmission channels under denial of service[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2018, 63(6): 1813-1820.
- [9] Cetinkaya A, Kikuchi K, Hayakawa T, et al. Randomized transmission protocols for protection against jamming attacks in multi-agent consensus[J]. Automatica, 2020, 117: 108960.
- [10] Deng Chao, Zhang Dan, Feng Gang. Resilient practical cooperative output regulation for MASs with unknown switching exosystem dynamics under DoS attacks[J]. Automatica, 2022, 139: 110172.
- [11] Fu Minyue, Xie Lihua. The sector bound approach to quantized feedback control[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(11): 1698-1711.
- [12] Kashyap A, Başar T, Srikant R. Quantized consensus[J]. Automatica, 2007, 43(7): 1192-1203.
- [13] Feng Shuai, Ishii H. Dynamic quantized consensus of general linear multiagent systems under denial-of-service attacks[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2022, 9(2): 562-574.
- [14] Feng Shuai, Ran Maopeng, Ishii H, et al. Dynamic quantized consensus under DoS attacks: Towards a tight zooming-out factor[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2024, 11(1): 340-352.
- [15] Ran Maopeng, Feng Shuai, Li Juncheng, et al. Quantized consensus under data-rate constraints and DoS attacks: A zooming-in and holding approach[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2023, 68(9): 5397-5412.
- [16] 李俊辉, 王伟, 王雨辰, 等. 基于预设时间一致性理论的无人机编队控制[J]. 兵工学报, 2025, 46(8): 20-33.
Li Junhui, Wang Wei, Wang Yuchen, et al. Unmanned aerial vehicle formation control based on prescribed-time consensus theory[J]. Acta Armamentarii, 2025, 46(8): 20-33. (in Chinese)
- [17] Wang Xinhe, Wen Guanghui, Zhao Dan, et al. Robust quantized consensus of multiagent systems under disturbance and DoS attacks[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2025, 12(2): 1626-1637.
- [18] De Persis C, Tesi P. Input-to-state stabilizing control under denial-of-service[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(11): 2930-2944.
- [19] Feng Shuai, Cetinkaya A, Ishii H, et al. Networked control under DoS attacks: Tradeoffs between resilience and data rate[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2021, 66(1): 460-467.
- [20] 刘泽群, 周军, 郭宗易, 等. 基于领航状态估计的多无人机构耦合协同编队控制[J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(6): 623-632.
Liu Zequn, Zhou Jun, Guo Zongyi, et al. Coupled cooperative formation control of multi-UAVs based on leader-state estimation[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(6): 623-632. (in Chinese)
- [21] Xu Tao, Duan Zhisheng, Sun Zhiyong, et al. A unified control method for consensus with various quantizers[J]. Automatica, 2022, 136: 110090.

作者简介



张 猛 男,1994年出生于河南省开封市。现为东南大学网络空间安全专业博士研究生。主要研究方向为网络攻击下多无人机系统分布式安全控制和容错控制。
E-mail: 230239277@seu.edu.cn



王新河 男,1994年出生于山东省济南市。现为东南大学网络空间安全专业博士研究生。主要研究方向为多智能体系统弹性控制。
E-mail: wangxinhe_sd@seu.edu.cn



王利楠 男,1996年出生于浙江省金华市。现为北京理工大学嘉兴研究院助理研究员。主要研究方向为无人机系统非光滑控制。
E-mail: linanwang96@163.com