

不规则DoS攻击下具有输入输出量化的非线性系统自适应输出反馈控制

曾雨雷, 武力兵, 齐淑彦*

辽宁科技大学理学院, 辽宁 鞍山

收稿日期: 2026年9月15日; 录用日期: 2026年10月9日; 发布日期: 2026年10月15日

摘 要

本文针对一类受到不规则拒绝服务(DoS)攻击的不确定性非线性系统, 研究了其在输入输出量化条件下的自适应输出反馈控制问题。该研究旨在解决输出量化导致的信号不连续不可微、虚拟控制律求导困难以及DoS攻击不规则中断通信的现象, 确保闭环系统的稳定性与控制性能。该目标通过引入动态滤波技术、参数投影估计器和增益切换状态观测器得以实现。首先, 利用动态滤波避免反步设计中虚拟控制信号的直接求导, 并结合参数投影方法处理量化误差对参数估计的影响; 其次, 设计增益切换状态观测器以适应DoS攻击下的输出反馈控制, 进而推导出输入输出量化下的自适应反步控制策略; 最后, 理论分析表明闭环信号半全局一致最终有界, 误差性能可通过设计参数调节, 数值仿真验证了所提方案的有效性。

关键词

非线性系统, 拒绝服务攻击, 量化控制, 输出反馈控制

Adaptive Output-Feedback Control for Nonlinear Systems with Input and Output Quantization under Irregular DoS Attacks

Yulei Zeng, Libing Wu, Shuyan Qi*

School of Science, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning

Received: September 15, 2026; accepted: October 9, 2026; published: October 15, 2026

Abstract

This paper investigates the adaptive output-feedback control problem for a class of uncertain

*通讯作者。

文章引用: 曾雨雷, 武力兵, 齐淑彦. 不规则 DoS 攻击下具有输入输出量化的非线性系统自适应输出反馈控制[J]. 应用数学进展, 2026, 15(10): 112-124. DOI: 10.12677/aam.2026.1510401

nonlinear systems subject to irregular denial-of-service (DoS) attacks, under the condition of input and output quantization. The study aims to address the challenges of signal discontinuity and non-differentiability caused by output quantization, the difficulty in differentiating virtual control laws in backstepping design, and the irregular communication interruptions induced by DoS attacks, while ensuring the closed-loop stability and control performance. To achieve this goal, a dynamic filtering technique, a parameter projection estimator, and a gain-switching state observer are introduced. Specifically, dynamic filtering is employed to avoid direct differentiation of virtual control signals in backstepping, and the parameter projection method is combined to mitigate the influence of quantization errors on parameter estimation. A gain-switching state observer is designed to accommodate output feedback control under DoS attacks, based on which an adaptive backstepping control strategy with input-output quantization is derived. Theoretical analysis shows that all closed-loop signals are semi-globally uniformly ultimately bounded, and the tracking error performance can be tuned by design parameters. Numerical simulations verify the effectiveness of the proposed scheme.

Keywords

Nonlinear Systems, Denial-of-Service Attacks, Quantitative Control, Output Feedback Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

网络化控制系统通过通信信道实现传感器、控制器与执行器之间的数据传输。由于通信带宽的固有局限性,信号在传输前通常需要经过量化处理。量化本质上是将连续信号映射至有限离散集合的非连续映射过程。尽管量化能够有效降低通信负担、提升信道利用率,但其引入的强非线性特性可能影响系统性能,甚至在极端情况下导致闭环系统失去稳定[1][2]。因此,如何在相对较低的通信速率下确保量化控制系统的满意闭环性能,构成了一个有待深入研究的重要课题。

迄今为止,量化控制问题已获得广泛关注,并涌现出大量研究成果。早期研究主要依托鲁棒控制理论,针对具有参数不确定性的系统开展了量化控制设计[3][4]。在此基础上,学者们进一步提出了针对非线性系统的自适应量化控制方案[5][6]。然而,值得注意的是,上述方案大多仅考虑控制输入通道中存在信号量化的情况,即量化后的控制输入仍然基于连续状态变量进行设计。

在实际远程控制系统中,状态输出信号与控制信号通常均需经由网络传输[7]。近年来,关于输入输出量化控制系统的研究逐渐受到重视。针对模型完全已知的系统,已有若干工作探讨了输入输出量化下的控制问题[8][9]。对于不确定系统,文献[10]给出了具有状态量化的线性系统的自适应控制方案,而文献[11]则针对同时具有量化输入和输出的非线性系统提出了自适应控制策略。尽管如此,上述方法中具有不匹配参数不确定性的非线性系统这一更一般情形仍未得到充分探索。

反步技术作为一种递归设计方法,为非线性和自适应控制提供了系统的设计框架[12]。然而,将反步技术应用于量化控制系统面临一个主要障碍:量化后的信号具有不连续性且不可微,导致传统反步设计中虚拟控制信号的导数实际上不存在。文献[13]针对具有状态量化的不确定非线性系统提出了一种基于自适应反步的控制设计方法,但该方法仅适用于一类特殊的不确定系统,因其必须利用虚拟控制律偏导数为常数的特性。随后,该方法被扩展至具有不匹配非线性的系统[14],然而该扩展方法仍无法直接应用于一般的不确定非线性系统。此外,上述结果均基于状态反馈架构,其在实际工程中的适用性受到限制。

在现代网络化控制系统中,网络安全威胁如 DoS 攻击,带来了额外的严峻挑战。DoS 攻击通过不规则地阻断通信信道,导致传感器数据和控制信号的传输发生中断,严重时可能破坏系统的稳定性与安全性[15][16]。尽管已有一些关于线性系统在 DoS 攻击下的弹性控制研究成果[17][18],但对于同时具有量化效应和参数不确定性的非线性系统,这一问题仍远未得到解决。文献[19][20]近期针对具有输入输出量化的非线性系统在间歇 DoS 攻击下的自适应控制问题开展了初步探索,但相关研究仍处于发展阶段。

基于上述讨论,本文针对具有输入输出量化的不确定非线性系统,在不规则 DoS 攻击条件下,提出了一种自适应输出反馈控制方法。本研究的主要创新点和贡献可归纳为以下三个方面:

与现有的严格反馈非线性系统递归控制方法[21]相比,本文不仅考虑了输入量化,还考虑了输出量化,这更好地利用了通信带宽,在工程应用中更实用。针对不规则 DoS 攻击下通信中断对量化控制系统带来的额外挑战,本文设计了具有增益切换能力的观测器与控制器结构:在正常通信时采用基于量化信号的观测与控制律;在攻击期间则切换至基于保持信号和估计输出的备份模式。

在参数自适应控制中,输出量化会引入有界误差,若直接使用量化信号更新参数,可能导致估计误差累积甚至系统失去稳定性。本文通过在参数更新律中引入投影操作,保证参数估计始终位于预设紧集内,从而有效约束量化误差的影响。

借鉴动态面控制(DSC)技术的思想[22],引入一阶滤波器,避免了直接对虚拟控制信号进行微分,同时构造了辅助的、基于原始连续输出信号的可微虚拟控制律,为后续稳定性分析与控制器实现提供了基础。该方法不仅克服了量化引起的不可微问题,还能适用于具有不匹配参数不确定性的更一般非线性系统。

2. 问题描述与预备知识

2.1. 量化器模型

本文考虑的量化器满足以下统一的有界误差特性:

$$|Q(s) - s| \leq \delta_s, \delta_s > 0 \quad (1)$$

其中 δ_s 为最大量化误差界。均匀量化器和对数-均匀量化器[23]均满足该性质,前者误差界由量化步长决定,后者由对数量化密度和切换阈值共同决定。

2.2. 系统描述

考虑以下一类具有输入和输出量化的不确定非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} + \mathcal{G}^T \psi_i(y) + g_i(y), \\ \dot{x}_n = Q(u) + \mathcal{G}^T \psi_i(y) + g_n(y), \\ y = x_1 \end{cases} \quad (2)$$

其中 $x_i \in R$ 为状态变量, $Q(u) \in R$ 为量化控制输入, $y \in R$ 为系统输出。 $\mathcal{G} \in R^r$ 是未知参数向量,属于已知的紧凸集 $\Omega_{\mathcal{G}} = \{\mathcal{G} : \|\mathcal{G}\| \leq \mathcal{G}_0\}$, $\psi_i(y) \in R^r$ 和 $g_i(y) \in R$ 是已知的光滑非线性函数,且 $\psi_i(0) = 0$ 。控制目标是设计基于量化输出信号的自适应输出反馈控制器,使闭环系统所有信号半全局一致最终有界。

假设 1: 函数 $\psi_i(y)$ 和 $g_i(y)$ 在全局范围内满足 Lipschitz 连续性,即存在已知常数 L_{ψ_i}, L_{g_i} 使得:

$$\|\psi_i(y) - \psi_i(\bar{y})\| \leq L_{\psi_i} |y - \bar{y}|, \|g_i(y) - g_i(\bar{y})\| \leq L_{g_i} |y - \bar{y}|$$

2.3. 不规则 DoS 攻击模型

定义攻击发生时间区间序列 $\{T_j = [t_j, t_j + \tau_j]\}$, 其中 t_j 为第 j 次攻击起始时刻, $\tau_j > 0$ 为持续时长。记:

$$\Xi(\tau, t) = \bigcup_{j \in N} T_j \cap [\tau, t],$$

$$\Lambda(\tau, t) = [\tau, t] \setminus \Xi(\tau, t)$$

分别表示区间内攻击总时长和正常通信总时长。攻击期间，控制器无法接收 $Q(y)$ ，执行器无法接收 $Q(u)$ ，采用零阶保持策略：

$$\tilde{y}(t) = \begin{cases} Q(y(t)), t \in \Lambda(0, \infty) \\ \tilde{y}(t_k), t \in \Xi(0, \infty) \end{cases} \quad u_{\text{eff}}(t) = \tilde{u}(t) = \begin{cases} Q(u(t)), t \in \Lambda(0, \infty) \\ \tilde{u}(t_k), t \in \Xi(0, \infty) \end{cases} \quad (3)$$

其中 t_k 为最后一次成功通信时刻， u_{eff} 为实际作用于系统的有效控制输入。为保证系统在攻击下仍具可控性，作出如下标准假设[14]：

假设 2 (攻击频率)：存在常数 $\sigma \geq 0$ ， $\tau_D > 0$ ，使得任意区间 $[\tau, t]$ 内的攻击次数为

$$m(\tau, t) \leq \sigma + (t - \tau) / \tau_D$$

假设 3 (攻击持续时间)：存在常数 $T > 1$ ，使得

$$|\Xi(\tau, t)| \leq (t - \tau) / T$$

在实际网络化控制系统中，控制器需实时感知通信链路状态以完成观测器与控制器模式的切换。本文采用一种基于超时计数器的检测机制：设定固定的超时阈值 $\tau_i > 0$ ，若控制器在超过 τ_i 时间内未接收到新的量化输出信号 $q(y(t))$ ，则判定遭受 DoS 攻击；否则视为正常通信模式。该检测策略仅依赖本地计时器，无需额外的网络握手协议，适用于资源受限的嵌入式控制节点。超时阈值 τ_i 的选取应满足： $\tau_i > \tau_c$ (τ_c 为正常通信下的最大传输时延)，且 $\tau_i < \tau_{\max}$ ($\tau_{\max}$ 为系统允许的最大数据缺失时长)，通常可取为采样周期的二到五倍。

一旦检测到攻击发生，控制器记录最后一次成功通信的时刻 t_{last} ，并将该时刻的控制信号 $u(t_{\text{last}})$ 作为保持信号持续输出，直至通信恢复。保持信号定义为：

$$u_{\text{hold}}(t) = u(t_{\text{last}}), \quad t \in [t_{\text{last}}, t_{\text{last}} + \tau_a),$$

其中， u_{hold} 为保持信号， τ_a 为当前攻击的持续时长。在攻击持续期间，滤波器的输入亦切换为保持信号。值得注意的是，零阶保持与零输入是 DoS 攻击下两种典型的开环补偿策略；相较于零输入策略，零阶保持能在一定程度上维持系统在攻击间歇期的运行状态，但同时也可能引入状态漂移的风险。

注 1：零阶保持策略在工程上易于实现，但其有效性依赖于攻击的间歇性。在长时间攻击下，保持信号与实际所需控制输入之间的偏差持续累积，可能导致状态估计误差和控制误差逐渐增大，严重时引发系统失稳。因此，该策略的适用前提是攻击满足上述假设中的频率与持续时间约束，且攻击总时长占比不超过定理 2 所规定的上界，即 $\Gamma_{\text{DOS}} < \alpha_0 / \alpha_0 + \alpha_1$ 。当攻击间歇相对于系统主导时间常数较短时(例如小于数倍时间常数，具体界限取决于系统开环动态)，保持偏差可在通信恢复后通过反馈回路快速修正；若攻击持续时间过长或过于频繁，则需考虑更为复杂的预测保持机制。本文方法适用于攻击间隔内正常通信足以维持估计精度、且攻击总时长占比满足稳定性条件的场景。

2.4. 增益切换状态观测器设计

由于仅有量化输出可测，设计如下双模式状态观测器：

正常模式 ($t \in \Lambda$)：

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_i &= \hat{x}_{i+1} + \hat{g}^T \psi_i(Q(y)) + g_i(Q(y)) + \kappa_i^s(Q(y) - \hat{y}) \\ \dot{\hat{x}}_n &= Q(u) + \hat{g}^T \psi_n(Q(y)) + g_n(Q(y)) + \kappa_n^s(Q(y) - \hat{y}) \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $\hat{y} = \hat{x}_1, \kappa^s = [k_1^s, \dots, k_n^s]^T$ 为正常模式观测器增益。

攻击模式 ($t \in \Xi$):

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}_i &= \dot{\hat{x}}_{i+1} + \hat{g}^T \psi_i(\hat{y}) + g_i(\hat{y}) + \kappa_i^a (\hat{x}_1 - \hat{y}) \\ \dot{\hat{x}}_n &= u_{hold} + \hat{g}^T \psi_n(\hat{y}) + g_n(\hat{y}) + \kappa_n^a (\hat{x}_1 - \hat{y})\end{aligned}\quad (5)$$

其中 u_{hold} 为零阶保持的控制信号, κ^a 为攻击模式增益。

定义选取增益使得矩阵 $A_e^s = A - \kappa^s C$ 与 $A_e^a = A - \kappa^a C$ 均为 Hurwitz, 其中 A 为具有上移结构的 $n \times n$ 矩阵, $C = [1, 0, \dots, 0]$ 。则存在对称正定矩阵 P^s, P^a 满足:

$$\begin{aligned}(A_e^s)^T P^s + P^s A_e^s &= -O^s, \\ (A_e^a)^T P^a + P^a A_e^a &= -O^a\end{aligned}\quad (6)$$

其中 $O^s, O^a > 0$ 。

定义估计误差 $\xi_i = x_i - \hat{x}_i$ 。正常模式下, 利用系统方程与观测器相减可得:

$$\dot{\xi} = A_e^s \xi + \psi^T(y) \vartheta + g(y) - \psi^T(Q(y)) \vartheta - g(Q(y)) + \kappa^s (y - Q(y))\quad (7)$$

攻击模式下则有:

$$\dot{\xi} = A_e^a \xi + \psi^T(y) \vartheta - \psi^T(\hat{y}) \hat{\vartheta} + g(y) - g(\hat{y})\quad (8)$$

3. 自适应量化控制器设计

3.1. 辅助虚拟控制与动态滤波

定义误差变量:

$$\begin{aligned}\zeta_1 &= y, \\ \zeta_i &= \hat{x}_i - \alpha_i^c, i = 2, \dots, n\end{aligned}\quad (9)$$

其中 α_i^c 为一阶滤波器输出:

$$\begin{aligned}\omega_i \dot{\alpha}_i^c + \alpha_i^c &= \alpha_{i-1}, \\ \alpha_i^c(0) &= \alpha_{i-1}(0), i = 2, \dots, n\end{aligned}\quad (10)$$

其中 $\omega_i > 0$ 为滤波器时间常数。记滤波误差 $\varepsilon_i = \alpha_i^c - \alpha_{i-1}$ 。

基于原始连续信号 y 和状态估计, 按反步递推构造辅助虚拟控制律:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= -c\zeta_1 - 2\zeta_1 - \hat{g}^T \psi_1(y) - g_1(y), \\ \alpha_i &= -c\zeta_i - \zeta_{i-1} - \zeta_i - \hat{g}^T \psi_i(y) - g_i(y) - (\kappa_i^s)^2 \zeta_i + \dot{\alpha}_i^c, i = 2, \dots, n-1, \\ v &= -c\zeta_n - \zeta_{n-1} - \hat{g}^T \psi_n(y) - g_n(y) - (\kappa_n^s)^2 \zeta_n + \dot{\alpha}_n^c\end{aligned}\quad (11)$$

其中 $c > 0$ 为设计参数, $\hat{g}$ 为 g 的估计。

3.2. 实际量化控制器与攻击切换策略

将上述辅助控制中的连续输出 y 替换为实际可得的量化信号 $Q(y)$ (正常模式)或 $\hat{y}$ (攻击模式), 并利用滤波器输出表达 $\dot{\alpha}_i^c = (\alpha_{i-1} - \alpha_i^c)/\omega_i$, 得到实际控制律:

正常模式 ($t \in \Lambda$):

$$\begin{aligned}
u &= -c\zeta_n - \zeta_{n-1} - \hat{g}^T \psi_n(Q(y)) - g_n(Q(y)) - (\kappa_n^s)^2 \zeta_n + \frac{\alpha_{n-1} - \alpha_n^c}{\omega_n}, \\
\zeta_1 &= Q(y), \zeta_i = \hat{x}_i - \alpha_i^c, \\
\alpha_1 &= -c\zeta_1 - 2\zeta_1 - \hat{g}^T \psi_1(Q(y)) - g_1(Q(y)), \\
\alpha_i &= -c\zeta_i - \zeta_{i-1} - \zeta_i - \hat{g}^T \psi_i(Q(y)) - g_i(Q(y)) - (\kappa_i^s)^2 \zeta_i + \frac{\alpha_{i-1} - \alpha_i^c}{\omega_i}, i=2, \dots, n-1
\end{aligned} \tag{12}$$

攻击模式 ($t \in \Xi$):

$$\begin{aligned}
u &= -c\bar{\zeta}_n - \bar{\zeta}_{n-1} - \hat{g}^T \psi_n(\hat{y}) - g_n(\hat{y}) - (\kappa_n^a)^2 \bar{\zeta}_n + \frac{\hat{\alpha}_{n-1} - \hat{\alpha}_n^c}{\omega_n}, \\
\bar{\zeta}_1 &= \hat{y}, \bar{\zeta}_i = \hat{x}_i - \hat{\alpha}_i^c, \\
\hat{\alpha}_1 &= -c\bar{\zeta}_1 - 2\bar{\zeta}_1 - \hat{g}^T \psi_1(\hat{y}) - g_1(\hat{y}), \\
\hat{\alpha}_i &= -c\bar{\zeta}_i - \bar{\zeta}_{i-1} - \bar{\zeta}_i - \hat{g}^T \psi_i(\hat{y}) - g_i(\hat{y}) - (\kappa_i^a)^2 \bar{\zeta}_i + \frac{\hat{\alpha}_{i-1} - \hat{\alpha}_i^c}{\omega_i}, i=2, \dots, n-1
\end{aligned} \tag{13}$$

其中 $\hat{\alpha}_i^c$ 为攻击模式下滤波器输出, 满足:

$$\begin{aligned}
\omega_i \dot{\hat{\alpha}}_i^c + \hat{\alpha}_i^c &= \hat{\alpha}_{i-1}, \\
\hat{\alpha}_i^c(0) &= \hat{\alpha}_{i-1}(0), i=2, \dots, n
\end{aligned} \tag{14}$$

注 2: 在攻击模式下, $\hat{\alpha}_i^c$ 的初始值取为攻击发生前最后一次正常通信时刻的滤波器状态, 以保证模式切换时控制信号的连续性。在正常模式下 $u_{\text{eff}} = Q(u)$, 在攻击模式下 $u_{\text{eff}} = u_{\text{hold}}$ 。

参数更新律在两种模式下统一设计为:

$$\dot{\hat{g}} = \text{Proj}_{\Gamma}(\Gamma \tau_{\sigma}), \quad \tau_{\sigma} = \begin{cases} \zeta_1 \psi_1(Q(y)), & t \in \Lambda \\ \bar{\zeta}_1 \psi_1(\hat{y}), & t \in \Xi \end{cases} \tag{15}$$

其中 $\Gamma > 0$ 为自适应增益矩阵, 投影算子 Proj_{Γ} 保证 $\|\hat{g}\| \leq \mathcal{D}_0 + \mu_g$, $\mu_g > 0$ 为任意小常数。投影算子的引入确保了参数估计的有界性, 从而有效抑制了量化误差对参数更新过程的负面影响。

由上分析, 存在与量化界 δ 、设计参数 c, ω_i 、Lipschitz 常数及参数界有关的正常数 $\gamma_{\zeta_i}, \gamma_{\alpha_i}$, 使得:

$$\begin{aligned}
|\zeta_i - \bar{\zeta}_i| &\leq \gamma_{\zeta_i}, \\
|\alpha_i - \bar{\alpha}_i| &\leq \gamma_{\alpha_i}, i=1, \dots, n
\end{aligned} \tag{16}$$

其表明用量化信号替换连续信号所产生的偏差是有界的, 且界可通过设计参数调节。

4. 主要结果

4.1. 理论证明

定理 1: 考虑由系统(2)、状态观测器(4)、量化控制器(12)、一阶滤波器(10)和参数估计器(15)在假设 1 下组成的闭环系统。给定任意正数 Λ , 对于所有满足

$$2\xi^T P^s \xi + \sum_{i=1}^n \zeta_i^2 + \tilde{g}^T \Gamma^{-1} \tilde{g} + \sum_{i=2}^n \varepsilon_i^2 \leq 2\Lambda$$

的初始条件, 如果存在观测器增益 $\kappa_1^s, \dots, \kappa_n^s$ 、滤波器时间常数 $\omega_2, \dots, \omega_n$ 、控制增益 c 、量化界 δ 、正定矩阵 P^s, Q^s, Γ 使得条件 $\beta > 0$ 满足(其中 β 将在(22)式中定义), 则闭环系统的所有解是半全局一致最终有界的。

证明：首先验证闭环系统的有界性。构造分段 Lyapunov 函数：

$$\begin{aligned} V_0 &= \xi^T P^s \xi, \\ V_1 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \zeta_i^2 + \frac{1}{2} \tilde{\mathcal{G}}^T \Gamma^{-1} \tilde{\mathcal{G}} + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n \varepsilon_i^2, \\ V &= V_0 + V_1 \end{aligned} \quad (17)$$

利用估计误差动态(7), Young 不等式 $2ab \leq \frac{1}{2c} \|\tilde{\mathcal{G}}\|^2 + 2c \|\xi\|^2$, $\|\psi^T(Q(y))\| \leq L_\psi \|Q(y)\|$, 对 V_0 求导可得：

$$\dot{V}_0 \leq -\left(\lambda_{\min}(O^s) - \frac{n}{4}\right) \|\xi\|^2 + \frac{1}{2c} \|\tilde{\mathcal{G}}\|^2 + \rho_0 \quad (18)$$

其中 ρ_0 为与量化界 δ 、Lipschitz 常数及参数界有关的常数项。

对 V_1 求导, 将误差变量 ζ_i 的动态代入并经过整理, 可得：

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq -\sum_{i=1}^{n-1} c \zeta_i^2 + \tilde{\mathcal{G}}^T \left(\zeta_1 \psi_1(y) - \Gamma^{-1} \dot{\hat{\mathcal{G}}} \right) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{4} \varepsilon_{i+1}^2 \\ &\quad + \frac{n-1}{4} \|\xi\|^2 - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\varepsilon_{i+1}^2}{\omega_{i+1}} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{|\varepsilon_{i+1}| |\kappa_{i+1}|}{\omega_{i+1}} + \Delta \end{aligned} \quad (19)$$

其中 κ_{i+1} 为与 $\zeta_j, \hat{\mathcal{G}}, \varepsilon_j$ 及其导数有关的连续函数, Δ 为量化界相关项。由于在紧集 $\{V \leq 2\Lambda\}$ 上 κ_{i+1} 由上界 M_{i+1} , 选择 ω_{i+1} 满足：

$$\frac{1}{\omega_{i+1}} = \frac{1}{4} + \frac{M_{i+1}^2}{v_{i+1}} + \eta_{i+1}, \eta_{i+1} > 0 \quad (20)$$

则可消去交叉项。

利用投影算子的性质 $-\tilde{\mathcal{G}}^T \Gamma^{-1} \text{Proj}_\Gamma(\Gamma \tau_\sigma) \leq -\tilde{\mathcal{G}}^T \tau_\sigma$ 以及公式(16), 处理参数更新项：

$$\tilde{\mathcal{G}}^T \left(\zeta_1 \psi(y) - \Gamma^{-1} \dot{\hat{\mathcal{G}}} \right) \leq \frac{1}{4} c \zeta_1^2 + \text{有界常数项} \quad (21)$$

综上所述所有项, 最终可得：

$$\dot{V} \leq -\beta V + \rho \quad (22)$$

其中

$$\beta = \min \left\{ \frac{\lambda_{\min}(O^s) - n/4}{\lambda_{\min}(P^s)}, \frac{1}{4} c, \frac{5}{8} c, \eta_2, \dots, \eta_n, \frac{1}{\lambda_{\max}(\Gamma^{-1})} \right\} > 0, \quad (23)$$

要求 $\lambda_{\min}(O^s) > n/4$ 。常数 ρ 包含所有量化界、参数界和设计参数的平方项。

由比较引理得：

$$V(t) \leq e^{-\beta t} V(0) + \frac{\rho}{\beta} \quad (24)$$

因此, 当 $V(0) \leq \Lambda$ 时, 对于所有 $t \geq 0$ 有 $V(t) \leq \Lambda$, 即 $V \leq \Lambda$ 为不变集。这意味着信号 $\xi, \zeta_i, \hat{\mathcal{G}}, \varepsilon_i$ 有界。由 $\zeta_1 = y$ 有界及 α_1 的表达式可知 α_1 有界; 由 $\varepsilon_2 = \alpha_2^c - \alpha_1, \zeta_2 = \hat{x}_2 - \alpha_2^c$ 可递推得 $\hat{x}_2, x_2$ 有界; 依此类推, 所有状态和控制信号均有界。

此外, 由(22)式可推出跟踪误差的均方界：

$$\frac{1}{T} \int_0^T \|\zeta(t)\|^2 dt \leq \frac{1}{\beta_0} \left(\frac{V(0)}{T} + \rho \right) \quad (25)$$

其中 $\beta_0 = \min \left\{ \frac{1}{4}c, \frac{5}{8}c \right\}$ 。通过选择足够大的 $c, \lambda_{\min}(O^s)$ 和足够小的 ω_i, δ ，可使跟踪误差任意小。定理 1 得证。

定理 2: 考虑系统(2)在不规则 DoS 攻击下，采用增益切换观测器(4~5)、切换控制器(12~13)和参数更新律(15)。在假设 2 和假设 3 下，如果以下条件满足：

正常模式条件：存在常数 $\alpha_0 > 0$ 使得 $\dot{V} \leq -\alpha_0 V + \rho_0$ (由定理 1 保证)；

攻击模式条件：存在常数 $\alpha_1 > 0$ 使得 $\dot{V} \leq -\alpha_1 V + \rho_1$ ；

攻击强度条件：攻击强度满足 $\Gamma_{\text{DOS}} < \frac{\alpha_0}{\alpha_0 + \alpha_1}$ ，则闭环系统所有信号半全局一致最终有界，且均方跟踪误差满足：

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \|\zeta(t)\|^2 dt \leq \frac{\rho_0(1 - \Gamma_{\text{DOS}}) + \rho_1 \Gamma_{\text{DOS}}}{\alpha_0(1 - \Gamma_{\text{DOS}}) - \alpha_1 \Gamma_{\text{DOS}}} \quad (26)$$

证明：为分析不规则 DoS 攻击下的系统稳定性，构造分段 Lyapunov 函数如下：

正常模式 ($t \in \Lambda$)：

$$V = \xi^T P^s \xi + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \zeta_i^2 + \frac{1}{2} \tilde{g}^T \Gamma^{-1} \tilde{g} + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n \varepsilon_i^2 \quad (27)$$

攻击模式 ($t \in \Xi$)：

$$V = \xi^T P^a \xi + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \bar{\zeta}_i^2 + \frac{1}{2} \tilde{g}^T \Gamma^{-1} \tilde{g} + \frac{1}{2} \sum_{i=2}^n \hat{\varepsilon}_i^2 \quad (28)$$

其中 $\hat{\varepsilon}_i = \hat{\alpha}_i^c - \hat{\alpha}_{i-1}$ 为攻击模式下的滤波误差。

根据定理 1 的推导，正常模式下有：

$$\dot{V} \leq -\alpha_0 V + \rho_0, t \in \Lambda \quad (29)$$

其中 $\alpha_0 = \beta > 0$ 。

在攻击模式下，由于通信中断，观测器无法获得输出反馈信号 $Q(y)$ ，控制器采用开环估计和保持信号。此时 Lyapunov 函数的导数可能为正。对误差动态(8)和攻击模式控制律(13)进行放缩，可得：

$$\dot{V} \leq \alpha_1 V + \rho_1, t \in \Xi \quad (30)$$

其中 $\alpha_1 > 0$ 取决于系统开环动态和观测器增益的最大特征值， ρ_1 为与量化界和模型不确定性有关的常数。

接下来分析切换系统的整体稳定性。考虑任意时间区间 $[0, T]$ ，将其划分为正常通信子区间 $\Lambda(0, T)$ 和攻击子区间 $\Xi(0, T)$ 。由(29)和(30)式，在正常区间上 Lyapunov 函数以速率 α_0 指数衰减，在攻击区间上以速率 α_1 指数增长。

设 $|\Lambda(0, T)| = T - |\Xi(0, T)|$ ，由比较引理可得：

$$V(T) \leq e^{-\alpha_0 |\Lambda(0, T)| + \alpha_1 |\Xi(0, T)|} V(0) + \int_0^T e^{-\alpha_0 |\Lambda(s, T)| + \alpha_1 |\Xi(s, T)|} [\rho_0 1_{s \in \Lambda} + \rho_1 1_{s \in \Xi}] ds \quad (31)$$

当 s 时刻处于正常通信模式 ($s \in \Lambda$) 时，指示函数 $1_{s \in \Lambda}$ 等于 1， $1_{s \in \Xi}$ 等于 0；当 s 时刻处于攻击模式 ($s \in \Xi$) 时，指示函数 $1_{s \in \Lambda}$ 等于 0， $1_{s \in \Xi}$ 等于 1。

由假设 3，存在常数 $T > 1$ 使得 $|\Xi(0, T)| \leq T/T$ ，即正常通信占比至少为 $1 - 1/T$ 。定义攻击强度

$T_{\text{DOS}} = \limsup_{T \rightarrow \infty} |\Xi(0, T)|/T$ 。若 $\Gamma_{\text{DOS}} < \frac{\alpha_0}{\alpha_0 + \alpha_1}$ 成立, 则存在常数 $\alpha^* > 0$ 使得:

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} [-\alpha_0 |\Lambda(0, T)| + \alpha_1 |\Xi(0, T)|] \leq -\alpha^* < 0 \quad (32)$$

因此, 当 $T \rightarrow \infty$ 时, $V(T)$ 有界, 且:

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} V(T) \leq \frac{\rho_0(1 - \Gamma_{\text{DOS}}) + \rho_1 \Gamma_{\text{DOS}}}{\alpha_0(1 - \Gamma_{\text{DOS}}) - \alpha_1 \Gamma_{\text{DOS}}} \quad (33)$$

进一步, 由 V 的定义可得 $\|\zeta(t)\|^2 \leq 2V(t)$ 。于是:

$$\limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \|\zeta(t)\|^2 dt \leq \limsup_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^T V(t) dt \quad (34)$$

利用 V 的有界性和上述不等式, 可得(26)式。这表明跟踪误差的均方值受攻击强度 Γ_{DOS} 和设计参数共同约束。

最后验证所有信号的有界性。由 V 有界可知 $\xi, \zeta_i, \bar{\zeta}_i, \hat{g}, \varepsilon_i, \hat{\varepsilon}_i$ 均有界。由 $\zeta_1 = y$ 有界、 α_1 的表达式及 $\varepsilon_2 = \alpha_2^c - \alpha_1$ 可递推得 $\hat{x}_i, x_i$ 有界。量化输出 $Q(y)$ 和量化输入 $Q(u)$ 的有界性由量化器性质保证。因此, 闭环系统所有信号在不规则 DoS 攻击下半全局一致最终有界。定理 2 得证。

4.2. 参数选择与讨论

定理 1 和定理 2 给出了保证闭环系统稳定性的充分条件(分别见式(22)和式(26)), 但实际应用中设计参数的合理选取对系统性能具有决定性影响。本节基于稳定性条件和性能边界公式, 提供一套系统化的参数整定指导, 并简要讨论关键参数间的权衡关系。

观测器增益 L 与 L^c 决定状态估计的收敛速度。增大增益可加快估计收敛, 但会放大测量噪声和量化误差, 并增加控制幅值, 工程上通常配置观测器极点使其动态显著快于系统动态, 以保证估计误差快速衰减, 同时需避免增益过高导致噪声放大。控制增益 c_i 影响误差衰减速率, c_i 越大响应越快, 但易激发未建模动态或执行器饱和; 滤波器时间常数 ω_i 越小, 滤波逼近精度越高, 但过小会引入高频振荡, 建议根据期望闭环带宽选取, 使滤波器具有足够快的响应能力而又不失平滑性。自适应增益矩阵 Γ 取对角形式 $\Gamma = \gamma I$, 初始值不宜过大, 以免量化误差激励参数振荡, 可在仿真中由小到大逐步调整; 投影界 Π 应略大于参数先验范围, 过紧会限制自适应能力, 过宽则削弱投影对量化误差的约束效果。量化器参数 δ 影响跟踪精度与通信率, 由式(25)可知误差界含 δ^2 项, 需在带宽约束下尽量取小。攻击检测超时 τ_i 应大于正常通信时延且小于系统允许的数据缺失容忍上限, 攻击强度须严格满足定理 2 条件 $\Gamma_{\text{DOS}} < \alpha_0/(\alpha_0 + \alpha_1)$, 并预留一定安全余量以应对模型不确定性。

参数选取可按如下流程进行: 初选 L 使观测器收敛速度快于系统动态; 选取 c_i 和 ω_i 以满足响应速度与平滑性的折中; 设定 Γ 和 Π 进行无攻击仿真, 观察参数估计的收敛行为; 引入量化器调整 δ 以平衡通信效率与控制精度; 最后引入攻击并验证攻击强度是否满足稳定条件, 通过闭环仿真逐步微调, 优先保证稳定性, 再优化瞬态性能。

各参数间存在固有的权衡关系, 增大 c_i 和观测器增益虽增强鲁棒性, 却增加控制成本与噪声敏感度; 提高闭环带宽可加快响应, 但会放大噪声与量化影响; 增大 ω_i 加速自适应, 但易致参数抖振; 粗量化节省通信但恶化精度。实际应用中需根据系统指标和约束, 通过仿真折中选取。

5. 仿真实例

为验证所提自适应量化控制方案在不规则 DoS 攻击下的有效性, 本节针对一个二阶不确定非线性系

统进行数值仿真。系统模型如式(2)所示, 其中未知参数取 $\vartheta = [-1.5, 1.2]^T$, 具体函数为:

$$\psi_1(y) = [0.3y, 0.4y]^T, \psi_2(y) = [0.4y, 0.3 \sin y]^T, g_1(y) = -5y, g_2(y) = 2.5 \cos y$$

仿真参数设置为控制增益 $c = 22$, 滤波器时间常数 $w_2 = 0.08$, 观测器增益 $\kappa_1 = \kappa_2 = 12$, 参数估计投影界 $\vartheta_0 = 2$, 自适应增益矩阵 Γ 为六倍单位阵。量化器采用对数-均匀型, 输出量化参数分别为 $\zeta_{th(y)} = 0.4, \zeta_{\min(y)} = 0.008, m_y = 0.15$; 输入量化参数分别为 $\zeta_{th(u)} = 20, \zeta_{\min(u)} = 0.08, m_u = 0.4$ 。仿真时长为 10 秒, 步长 0.01 秒, 初始状态 $x(0) = [0.5, 0.1]^T$, 观测器初值置零, 参数估计初值为零, 滤波器初值 $\alpha_2^c(0) = -10$ 。采用满足假设的不规则 DoS 攻击模型, 攻击参数设置为 $\sigma = 1, \tau_D = 0.2, T = 3.86$ 。攻击序列随机生成, 满足假设 2 和假设 3 中的频率与持续时间约束。

仿真结果图 1、图 2 分别展示了在有无攻击情况下系统输出 y 及其量化输出 $Q(y)$ 的对比、状态 x_2 与其估计 $\hat{x}_2$ 的轨迹、控制输入 u 与理想量化控制输入 $Q(u)$ 与实际执行输入 u_{eff} 的对比、参数估计 $\hat{\vartheta}_1$ 与 $\hat{\vartheta}_2$ 的变化轨迹。为了进一步验证本文所提 DoS 攻击弹性切换机制的有效性, 图 3 展示了在相同 DoS 攻击场景下有无弹性切换机制的关于状态轨迹、控制输入和跟踪误差的对比, 可见本文所提机制在维持系统稳定性、抑制攻击影响方面的优越性。图 4 展示了攻击持续的状态和标记攻击时刻的输出 y 。可见量化器在保证跟踪性能的同时显著降低了通信数据量, 估计器在正常通信期间能有效跟踪状态, 攻击期仍保持有界, 在 DoS 攻击下控制器通过信号保持机制仍能维持系统运行, 攻击期间估计暂停更新, 恢复正常后继续收敛至真值附近。

综上所述, 与无量化方案进行对比可发现, 所设计的量化控制器在几乎不影响系统性能的前提下将连续信号离散化, 大幅降低了通信负担。同时, 在不规则 DoS 攻击下, 所提出的攻击弹性机制能够在可接受范围内保持系统稳定。所以该仿真结果验证了本文所提基于自适应量化控制方法的有效性。

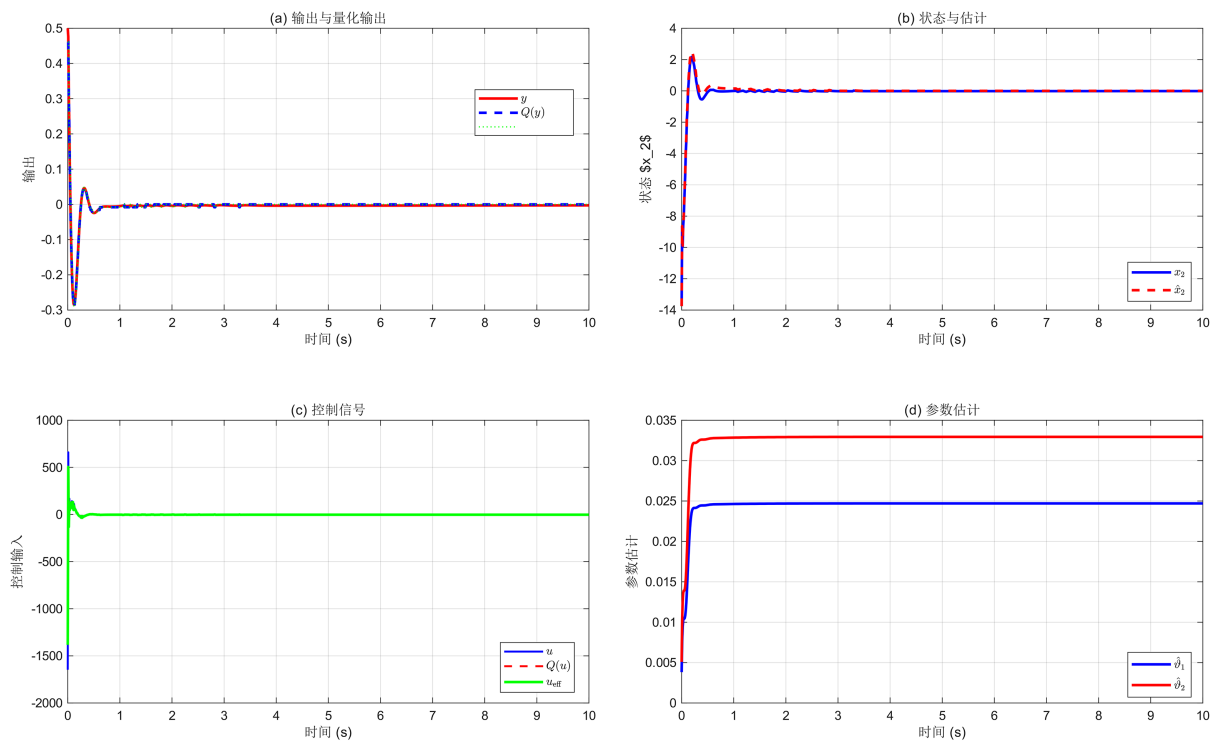


Figure 1. Simulation results under no-attack conditions

图 1. 无攻击下的仿真结果

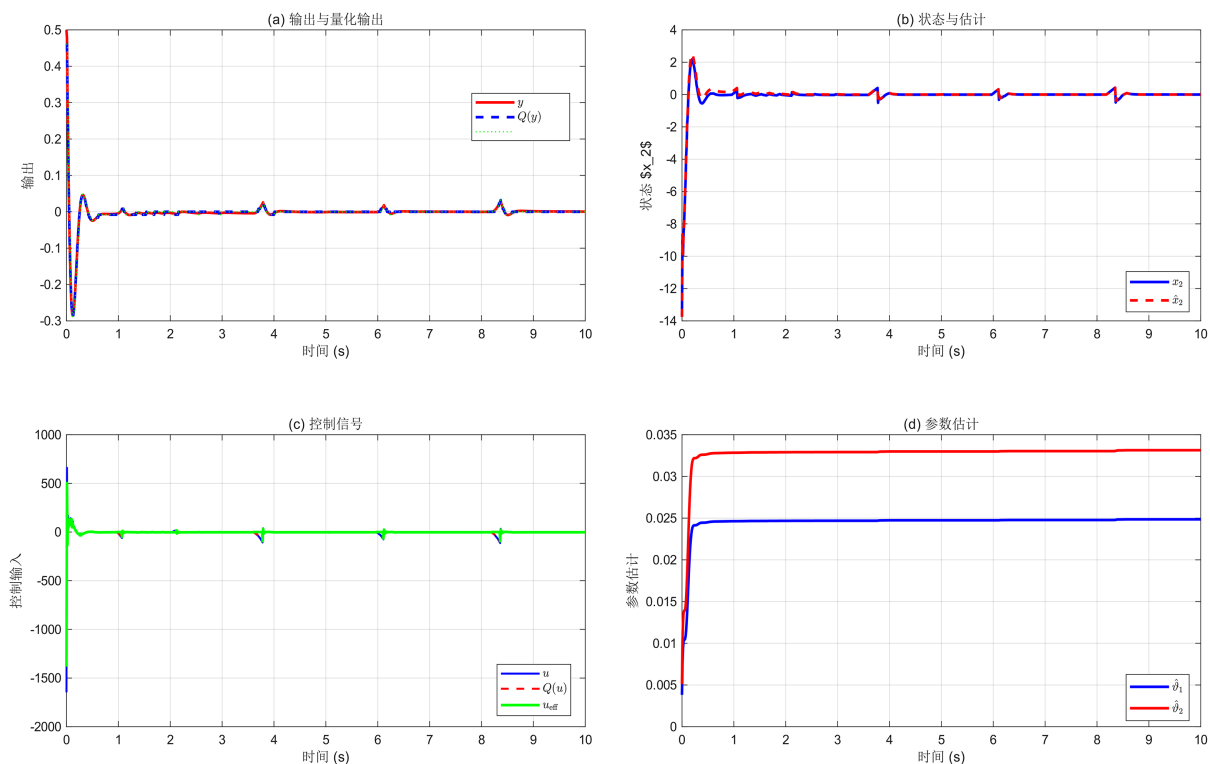


Figure 2. Simulation results under attack

图 2. 有攻击下的仿真结果

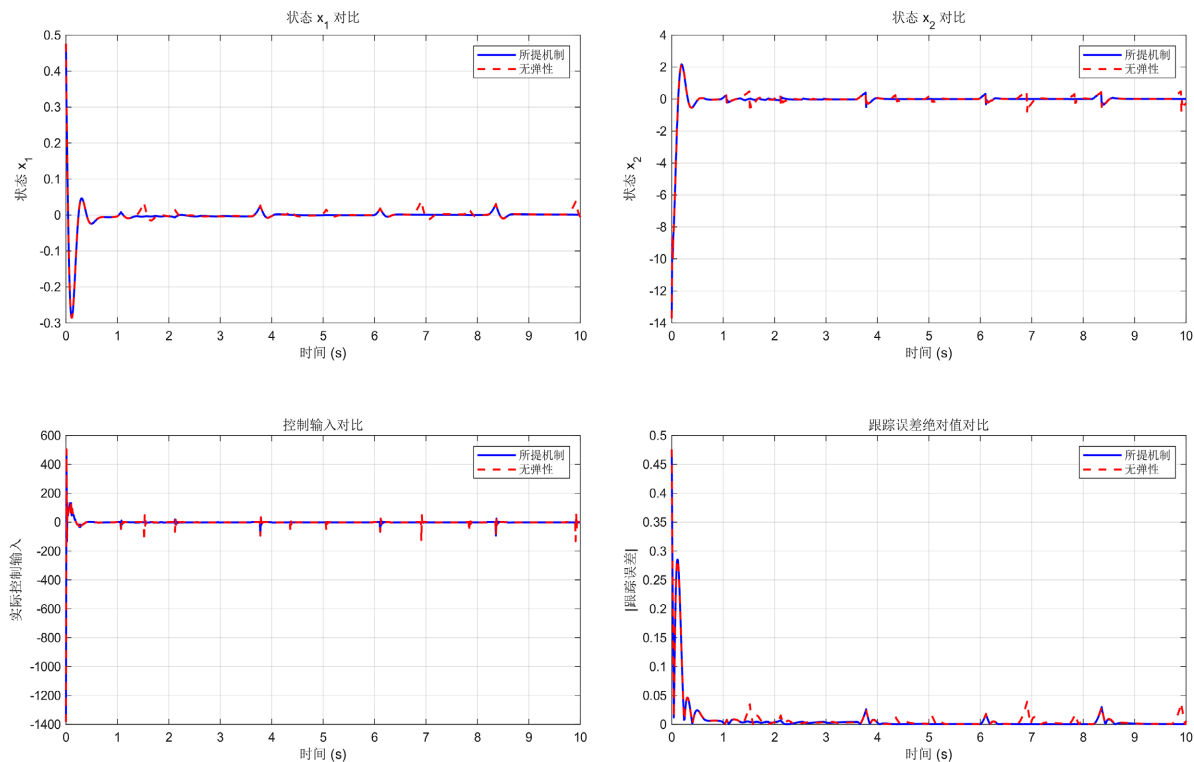


Figure 3. Comparative simulation results for the presence or absence of an elastic mechanism

图 3. 有无弹性机制的对比仿真结果

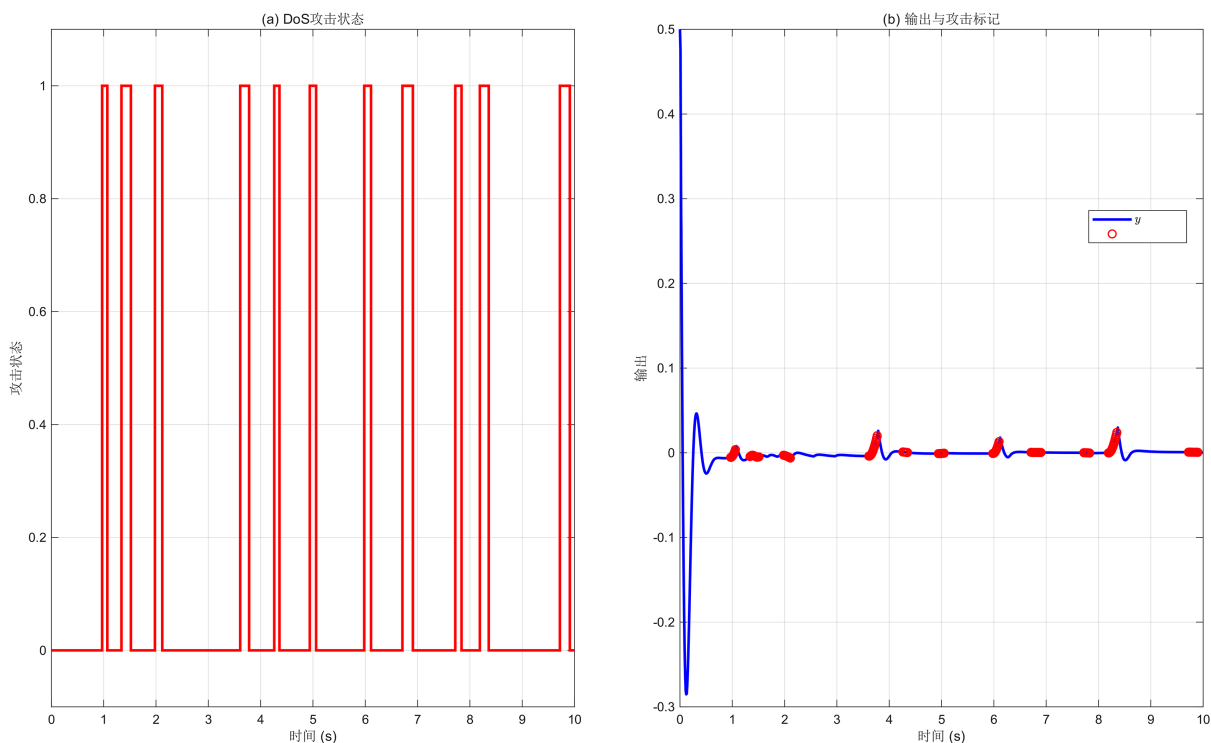


Figure 4. Service denial-of-service attack characteristics

图 4. 拒绝服务攻击特性

6. 结论

本文研究了输入输出同时量化的不确定非线性系统在不规则 DoS 攻击下的自适应输出反馈控制问题。通过融合动态滤波、投影参数更新和增益切换观测器，成功克服了量化信号不可微、参数估计受扰及通信中断的困难。理论分析给出了保证闭环稳定性的攻击强度条件，并量化了跟踪误差界与设计参数的关系。仿真证实了方法的有效性与资源节约优势。后续工作可考虑更复杂的欺骗攻击、分布式多智能体量化控制及基于数据驱动的攻击补偿策略。

致 谢

感谢导师在论文选题、研究思路及撰写过程中给予的悉心指导与宝贵建议；感谢课题组各位同窗在学术讨论中的思想碰撞与热心帮助。在这里向所有评阅本论文并提出修改意见的专家和老师表示由衷的敬意与感谢。

基金项目

国家自然科学基金(项目编号: 62441309)、辽宁省科技厅联合基金计划(项目编号: 2025-MSLH-349)以及辽宁省高校基本科研业务费专项资金(项目编号: LJ212410146024)。

参考文献

- [1] Elia, N. and Mitter, S.K. (2001) Stabilization of Linear Systems with Limited Information. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **46**, 1384-1400. <https://doi.org/10.1109/9.948466>
- [2] Tatikonda, S. and Mitter, S. (2004) Control under Communication Constraints. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **49**, 1056-1068. <https://doi.org/10.1109/tac.2004.831187>

- [3] Minyue Fu, and Lihua Xie, (2005) The Sector Bound Approach to Quantized Feedback Control. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **50**, 1698-1711. <https://doi.org/10.1109/tac.2005.858689>
- [4] Liberzon, D. (2003) Hybrid Feedback Stabilization of Systems with Quantized Signals. *Automatica*, **39**, 1543-1554. [https://doi.org/10.1016/s0005-1098\(03\)00151-1](https://doi.org/10.1016/s0005-1098(03)00151-1)
- [5] Hayakawa, T., Ishii, H. and Tsumura, K. (2009) Adaptive Quantized Control for Linear Uncertain Discrete-Time Systems. *Automatica*, **45**, 692-700. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2008.07.005>
- [6] Zhou, J., Wen, C. and Yang, G. (2014) Adaptive Backstepping Stabilization of Nonlinear Uncertain Systems with Quantized Input Signal. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **59**, 460-464. <https://doi.org/10.1109/tac.2013.2270870>
- [7] Nair, G.N. and Evans, R.J. (2003) Exponential Stabilisability of Finite-Dimensional Linear Systems with Limited Data Rates. *Automatica*, **39**, 585-593. [https://doi.org/10.1016/s0005-1098\(02\)00285-6](https://doi.org/10.1016/s0005-1098(02)00285-6)
- [8] Liu, T., Jiang, Z.P. and Hill, D.J. (2012) A Sector Bound Approach to Feedback Control of Nonlinear Systems with State Quantization. *Automatica*, **48**, 145-152. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2011.09.041>
- [9] Sun, H., Hovakimyan, N. and Basar, T. (2012) L_1 Adaptive Controller for Uncertain Nonlinear Multi-Input Multi-Output Systems with Input Quantization. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **57**, 565-578. <https://doi.org/10.1109/tac.2011.2159884>
- [10] Wang, W., Zhou, J., Wen, C. and Long, J. (2022) Adaptive Backstepping Control of Uncertain Nonlinear Systems with Input and State Quantization. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **67**, 6754-6761. <https://doi.org/10.1109/tac.2021.3131958>
- [11] Zhang, Z., Wen, C., Song, Y. and Feng, G. (2023) Adaptive Quantized Output Feedback Control of Nonlinear Systems with Mismatched Uncertainties and Sensor Failures. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **68**, 8216-8223. <https://doi.org/10.1109/tac.2023.3292743>
- [12] Kanellakopoulos, I., Kokotovic, P.V. and Morse, A.S. (1991) Systematic Design of Adaptive Controllers for Feedback Linearizable Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **36**, 1241-1253. <https://doi.org/10.1109/9.100933>
- [13] Gao, Z., Song, Y. and Polycarpou, M.M. (2024) Adaptive Security Control Using Output Only for Quantized Nonlinear Systems under Irregularly Intermittent Dos Attacks. *IEEE Transactions on Cybernetics*, **54**, 6755-6766. <https://doi.org/10.1109/tcyb.2024.3438288>
- [14] De Persis, C.D. and Tesi, P. (2015) Input-to-State Stabilizing Control under Denial-of-Service. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **60**, 2930-2944. <https://doi.org/10.1109/tac.2015.2416924>
- [15] Zhang, H., Cheng, P., Shi, L. and Chen, J. (2016) Optimal Denial-of-Service Attack Scheduling with Energy Constraint. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **60**, 3023-3028. <https://doi.org/10.1109/TAC.2015.2409905>
- [16] De Persis, C. and Tesi, P. (2016) Networked Control of Nonlinear Systems under Denial-of-Service. *Systems & Control Letters*, **96**, 124-131. <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2016.07.007>
- [17] Gao, W., Jiang, Z.P. and Chai, T. (2025) Resilient Control under Denial-of-Service and Uncertainty: An Adaptive Dynamic Programming Approach. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **70**, 4085-4092. <https://doi.org/10.1109/TAC.2025.3527305>
- [18] Feng, S., Cetinkaya, A., Ishii, H., Tesi, P. and De Persis, C. (2020). Networked Control under DoS Attacks: Tradeoffs between Resilience and Data Rate. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **66**, 460-467. <https://doi.org/10.1109/TAC.2020.2981083>
- [19] Liu, S., Wang, X., Chen, W., Niu, B., Song, X., Wang, H. and Zhao, X. (2024) Adaptive Control for Uncertain Nonlinear Systems against DoS Attacks Using Quantized Output Only and Application to a Single-Link Robot. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **22**, 5262-5271. <https://doi.org/10.1109/TASE.2024.3418194>
- [20] Xie, X. and Wang, F. (2026) Adaptive Control for Nonlinear Systems with Input and Output Quantization under DoS Attacks. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, **40**, 470-485. <https://doi.org/10.1002/acs.70004>
- [21] Zhou, J., Wen, C., Wang, W. and Yang, F. (2019) Adaptive Backstepping Control of Nonlinear Uncertain Systems with Quantized States. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **64**, 4756-4763. <https://doi.org/10.1109/TAC.2019.2906931>
- [22] Swaroop, D., Hedrick, J.K., Yip, P.P. and Gerdes, J.C. (2000) Dynamic Surface Control for a Class of Nonlinear Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, **45**, 1893-1899. <https://doi.org/10.1109/tac.2000.880994>
- [23] Xing, L.T., Wen, C., Zhu, Y., Su, H. and Liu, Z. (2016) Output Feedback Control for Uncertain Nonlinear Systems with Input Quantization. *Automatica*, **65**, 191-202. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2015.11.028>