DoS 攻击下基于自适应事件触发的无人水面艇航向控制和故障检测

赵云波　王岭人　叶泽华

（浙江工业大学信息工程学院 杭州 310000）

摘　要　针对网络能力受限和非周期 DoS 攻干扰的网络化 USV 系统，提出一种基于自适应事件触发的故障检测滤波器和控制器的设计方法。首先，构建一个考虑非周期 DoS 攻击、外部干扰和执行器故障同时存在的 USV 控制系统。然后，针对网络化 USV 系统，提出一种自适应事件触发机制，动态更新触发阈值，减少网络资源浪费。其次，通过构造一个分段 Lyapunov 函数，给出闭环系统全局指数稳定且具有指定H_∞干扰衰减指数的充分条件，并设计基于观测的故障检测滤波器和控制器。最后，通过仿真验证方法的有效性。结果表明，该方法不仅能对 USV 系统航向进行有效控制，而且能在节省网络资源的同时检测执行器故障的发生和位置。

关键词　无人水面艇(USV)，网络化控制系统（NCS），DoS 攻击，自适应事件触发，故障检测滤波器(FDF)

0　引　言

无人水面艇（USV）是一种可以实现水面上自我规划和导航的小型无人智能车辆，具有体积小、航速快的优点。因此在过去几十年里，对 USV 运动控制的理论研究一直是热点[1]，并广泛应用于实际中，如海洋环境监测[2]、煤石油勘探[3]、军事作战等领域。虽然 USV 具有很大的应用价值，但从理论研究转变到实际应用仍有较大差距，主要原因在于 USV 对环境干扰特别敏感[4,5]。当 USV 在海上执行任务时，不可避免地会受到例如海浪、大风等海洋扰动影响，而在实际应用中对 USV 有较高的高精度和可靠性要求，因此提高 USV 在各种干扰下的运动控制性能尤为重要。

目前，我们通常利用无线网络和远程控制站控制 USV 的运动，即网络化 USV。网络化控制系统(NCS)具有成本低、灵活性高、数据共享、维护方便等优势，已广泛应用于 USV 系统的控制系统中[6-8]，但也面临着一些固有挑战。

1）由于网络能力受限，周期采样机制在通信网络上可能传输大量不必要数据包，造成网络通道堵塞和网络资源的浪费[9]。文献[10,11]通过实验仿真验证事件触发能以减少数据传输次数的方式减轻网络负载，提升系统性能，文献[12]在大量被控对象连入网络中时对周期触发机制和事件触发机制的性能进行比较，文献[13]引入与输出相关的事件触发条件研究网络控制系统的稳定性。通常事件触发条件是恒定的，仍会造成一定的资源浪费，而自适应事件触发机制可以权衡系统性能和网络资源成本[14]。文献[15]针对具有切换拓扑的滤波网络提出自适应事件触发机制，可以根据估计和传输误差动态更新触发阈值。文献[16]针对离散时间的网络化控制系统，提出一种自适应调整的事件触发参数的故障检测机制。文献[17]基于事件触发机制的 UMV 控制系统，通过强化学习方法获得最优事件触发阈值。

2）由于网络的开放性，NCS 容易受到各种网络攻击，包括拒绝服务(DoS)攻击和欺骗攻击，干扰通信通道，阻止信号正常传输[18]。文献[19,20]考虑周期性 DoS 攻击，文献[21,22]考虑随机性 DoS 攻击，文献[23]考虑 DoS 攻击下多通道传输的弹性状态估计，文献[24]考虑DoS攻击下的自适应事件触发滤波器设计。文献[14]考虑具有事件驱动通信和 DoS 攻击下的 USV 系统，文献[25]针对具有 DoS 攻击的 USV 系统的跟踪控制问题提出一种动态反馈控制算法。

另外，在网络环境下，及时检测 USV 系统故障的发生如转向机卡死、饱和、噪声等非常重要[6]。一般，故障检测机制通过建立残差信号与规定的阈值作比较来检测故障，当残差信号超过一定的阈值立即产生报警信号。文献[16]考虑事件触发控制下的网络化控制系统的故障检测滤波器(FDF)和控制器设计，文献[26]考虑更一般的非线性网络系统的基于事件触发的故障检测，文献[6]考虑 USV 系统中的故障检测，文献[14]针对 DoS 攻击下的 USV 系统设计基于事件触发的故障检测滤波器和控制器。

因此考虑现实中网络能力受限，DoS 攻击，以及系统故障等因素影响，针对这样更复杂的网络化

USV 控制系统，设计一种有效的航向控制和故障检测方案具有现实意义。

针对网络能力受限和非周期 DoS 攻击下的网络化 USV 系统，本文提出一种基于自适应事件触发的故障检测滤波器和控制器方法。1.考虑外部干扰、网络时延、非周期 DoS 攻击和执行器故障等影响，建立一种新的网络化 USV 系统。2.提出一种自适应事件触发机制，动态更新触发阈值，与恒阈值事件触发机制[14]相比，可以有效减少触发次数，减轻通信网络的负担。3.提出一种基于观测的故障检测滤波器和控制器，有效控制 USV 系统航向，保证 USV 系统对干扰的鲁棒性。

本文其他部分组织如下。第 1 节定义所研究的问题；第 2 节构造执行器故障和非周期 DoS 攻击同时存在的网络化 USV 系统模型；第 3 节基于构造的模型给出稳定性分析及故障检测滤波器和控制器的设计；第 4 节利用仿真对比实验验证方法的有效性；第 5 节总结全文。

1　问题描述

我们考虑网络能力受限和遭受 DOS 攻击下的网络化 USV 控制系统，如图 1 所示，对 USV 系统进行航向控制和故障检测。实际应用中，执行器往往会受到一些外部输入影响，包括故障和干扰。一般来说，没有故障和攻击的网络化 USV 控制系统是稳定的，如果系统存在执行器故障和 DoS 攻击，那么系统性能会下降甚至不再稳定，因此如何在受到 DoS 攻击的情况下还能有效控制 USV 系统航向稳定并检测故障至关重要。

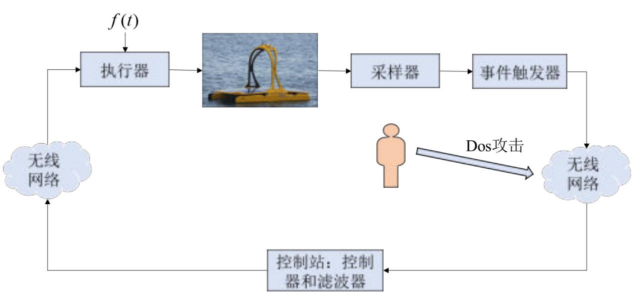

图 1 DoS 攻击下的网络化 USV 控制系统结构

1.1　网络化 USV 控制系统

一般来说，无人水面艇在实际航行中运动复杂，包括 6 个自由度的运动：前向，横向，升沉，横摇，纵摇和偏航。若将 6 个自由度的运动全都予以考虑，无人水面艇的运动数学模型过于复杂，本文选择一个 3 自由度的装有推进器的锚定无人水面艇作为目标对象模型，进而简化成 3 自由度，视升沉、横摇和纵摇的影响为干扰。

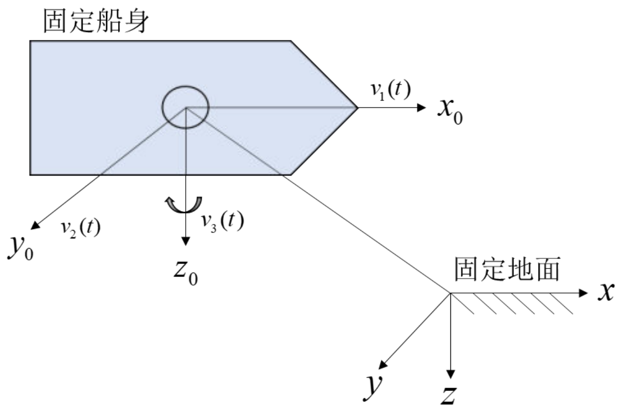

图 2 固体船身和固定地面参考系

考虑图 2 中固定船身和固定地面的参照系，其中 x_0、y_0、z_0分别表示纵轴、横轴和法向轴，x、y、z分别表示地面固定的参照系。

无人水面艇的固定船身的 3 自由度运动方程可被描述为：

$$M\dot{v}(t)+Nv(t)+G\eta(t)=u(t) \tag{1}$$

其中 $v(t)=\begin{bmatrix}v_1(t) & v_2(t) & v_3(t)\end{bmatrix}^T$ 是速度向量，$v_1(t)$、$v_2(t)$、$v_3(t)$分别表示前向、横向、偏航的速度向量；$\eta(t)=\begin{bmatrix}x_p(t) & y_p(t) & \psi(t)\end{bmatrix}^T$，$x_p(t)$、$y_p(t)$ 表示位置，$\psi(t)$ 表示偏航角；$u(t)=\begin{bmatrix}u_1(t) & u_2(t) & u_3(t)\end{bmatrix}^T$是控制向量，$u_1(t)$、$u_2(t)$、$u_3(t)$分别表示前向输入、横向输入和推进器系统输入。$M$ 为可逆惯性矩阵满足 $M=M^T>0$，N 为阻尼矩阵，G为停泊力矩阵。函数 $\eta(t)$满足

$$\dot{\eta}(t)=J\ (\psi(t))v(t) \tag{2}$$

其中$J\ (\psi(t))=\begin{bmatrix}\cos(\psi(t)) & -\sin(\psi(t)) & 0\\ \sin(\psi(t)) & \cos(\psi(t)) & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}$。

当无人水面艇在进行科学勘探等任务时，可能停下来并抛锚。假设偏航角 $\psi(t)$足够小时，那么

$\cos(\psi(t))$趋向 1，$\sin(\psi(t))$趋向 0，使得J 近似于I。

令 $x(t)=v(t)$， $A_1=M^{-1}G$， $A=-M^{-1}N$，$B=M^{-1}$，状态空间方程可转化成

$$\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t)-A_1g(t,x(t)) \tag{3}$$

其中 $g(t,x(t))=\eta(t)$表示 $x(t)$的时变非线性向量函数。另外，考虑到无人水面艇会受到海洋中风、海浪等影响，我们加入 $\bar{D}(t)$表示海洋中未知的干扰，式(3)可转化成

$$\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t)+\bar{D}(t)-A_1g(t,x(t)) \tag{4}$$

令 $\tilde{D}(t)=\bar{D}(t)-A_1g(t,x(t))$，则式(4)可转化成

$$\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t)+\tilde{D}(t) \tag{5}$$

我们的目的是设计一个跟踪控制律，从而设定一个参考的期望状态 $x_{ref}(t)$，使得 $x(t)$能跟踪上，且控制目标是使得跟踪误差尽可能得小。

令 $e(t)=x(t)-x_{ref}(t)$，则

$$\dot{e}(t)=Ae(t)+Bu(t)+w(t) \tag{6}$$

其中

$w(t)=\begin{bmatrix} w_1(t) & w_2(t) & w_3(t)\end{bmatrix}^T=Ax_{ref}+\tilde{D}(t)$，

控制输出向量 $y(t)$可描述为

$$y(t)=Ce(t) \tag{7}$$

其中C为输出矩阵。

结合(6)和(7)，误差动态方程可表示成

$$\begin{cases}\dot{e}(t)=Ae(t)+Bu(t)+w(t)\\ y(t)=Ce(t),e_0=e(t_0)\end{cases} \tag{8}$$

其中 $e(t)\in \mathrm{R}^n$， $u(t)\in \mathrm{R}^s$分别表示系统误差状态和系统的控制输入， $w(t)\in \mathrm{R}^q$为未知扰动，属于$l_2[0 \quad \infty)$，初始状态 $e_0\in\ ^n$，A、B、C 对应已知的合适维度的常数系统矩阵。

另外，USV 系统在网络环境下会出现饱和、转向机卡死、噪声等故障，这是不可避免的。我们考虑执行器端的故障。那么(6)可转化成

$$\dot{e}(t)=Ae(t)+B(u(t)+f(t))+w(t) \tag{9}$$

其中 $f(t)\in \mathrm{R}^l$表示执行器的故障信号。

那么误差动态方程(8)可表示成

$$\begin{cases}\dot{e}(t)=Ae(t)+B(u(t)+f(t))+w(t)\\ y(t)=Ce(t),e_0=e(t_0)\end{cases} \tag{10}$$

本文不考虑数据包无序，并假设构造的网络不存在时延产生的丢包，且只考虑采样器和控制站之间的网络时延。以上即为存在执行器故障的网络化 USV 系统模型。

1.2 非周期 DoS 攻击

假设采样器和控制站之间的通信通道在某一时刻被攻击者阻塞，在此情况下数据无法到达控制站。本文考虑存在 DoS 攻击的情况。

DoS 攻击是一种常见的网络攻击，即拒绝服务攻击，会极大地降低系统的性能，因此有必要对 DoS 攻击进行研究。本文考虑采样器和控制器之间的网络通道存在 DoS 攻击，其攻击形式可参考文献[17]。为了简化后续的研究分析，非周期的 DoS 攻击信号的分段函数如下：

$$A_{Dos}=\begin{cases}0, & t\in\left[h_{n-1},h_{n-1}+\Delta_{n-1}\right)\triangleq\Gamma_{1,n-1}\\ 1, & t\in\left[h_{n-1}+\Delta_{n-1},h_n\right)\triangleq\Gamma_{2,n-1}\end{cases} \tag{11}$$

其中$\left[h_{n-1},h_{n-1}+\Delta_{n-1}\right),(n\in\ ,h_{n-1}\ge 0)$表示不存在攻击信号且通信信号正常的第 n 次 DoS 攻击间隔，$\left[h_{n-1}+\Delta_{n-1},h_n\right),n\in$ 表示存在攻击信号且数据包无法传输的第 n 次 DoS 攻击间隔，Δ_{n-1}表示攻击的睡眠时长， $h_{n-1}+\Delta_{n-1}$，h_n分别表示第 n 次 DoS 攻击开始和结束的时刻。对于 $n\in$ ，有 $h_n>h_{n-1}+\Delta_{n-1}$。另外，本文的攻击信号是非周期性的，即每个攻击的睡眠时长 Δ_{n-1}不完全相同。

需要指出的是本文所考虑的 DoS 攻击能够造成百分百丢包，如果攻击的持续时间任意大的话，USV 一直处于开环状态，那么此时无法达到控制目标。由此，我们有必要做出以下假设：

假设 1 对于时间间隔 $\Gamma_{1,n}$时，存在一个标量 Δ_{n-1}满足 $\Delta_{\min}\le\inf_{n\in}\{\Delta_n\}$；对于时间间隔 $\Gamma_{2,n}$时，存在一个标量 $d_{\max}$满足 $d_{\max}\ge\sup_{n\in}\{h_{n+1}-h_n-\Delta_n\}$。

假设 2 被时间间隔 $\Gamma_{2,n}$ 指定的攻击序列受到频率限制，即，在 $\forall t\in\ _{\ge 0}$下，对于给定的 $\tau_D\in\ _{>0}$，$\hat{i}\in\ _{>0}$，攻击信号序列满足

$$N(0,t) \le \hat{i} + \frac{t}{\tau_D}$$

其中 τ_D 表示平均驻留时间， $N(0,t)$ 表示发生在时间区间 $[0,t)$ 上的 DoS 攻击开关的转换次数，即 $N(0,t) = card\{n \in \quad | t > h_n + \Delta_n\}$，$card$ 表示集合 $N(0,t)$ 中的元素个数，可参考文献[14]，。

基于上面的讨论，误差动态方程(10)可表示成

$$\begin{cases} \dot{e}(t) = Ae(t) + B(u(t) + f(t)) + w(t), \text{无攻击} \\ \dot{e}(t) = Ae(t) + Bf(t) + w(t), \text{有攻击} \end{cases} \tag{12}$$

在上述假设下，DoS 攻击是非周期性的，在采样器到控制站的网络通道中造成连续的数据传输中断。DoS 攻击的持续时间取决于 DoS 攻击睡眠间隔的下界 $\Delta_{\min}$ 和攻击活动间隔的上界 $d_{\max}$，用于第 2 节的性能分析。一个较大的 $\Delta_{\min}$ 和一个较小的 $d_{\max}$ 表示一个持续时间内较少的攻击。另外，由于无限制的 DoS 攻击会使得系统一直处于开环状态，因此对 DoS 攻击的频率和持续时间做出有界假设是必要的，且对于 USV 系统的应用具有实际意义。

2　基于事件触发的 FDF 和控制器设计

针对第 1 节所描述的网络能力受限和 DoS 攻击干扰下的网络化 USV 系统，本文提出一种基于自适应事件触发的故障检测滤波器和控制器设计方法。

2.1　自适应事件触发机制设计

采样器采得的输出信号通过无线网络将数据包发送到控制站，考虑到现实中网络能力的限制，本文引入自适应事件触发机制，当满足一定的事件触发条件即可触发传输过程，可以减少采样器到控制器的无线网络中有限网络资源的不必要使用，减轻网络负担，节省网络资源。

事件触发条件如下，数据包经过事件触发器判断条件是否满足，再通过网络传输到控制站。

$$\begin{aligned} &[y((t_k+m)h) - y(t_k h)]^T W [y((t_k+m)h) - y(t_k h)] \\ &\quad > \varepsilon((t_k+m)h) y(t_k h)^T W y(t_k h) \end{aligned} \tag{13}$$

其中 $h, 0 < h < \Delta_n$ 表示采样器的采样周期，$t_k, t \in \quad_+$ 表示第 k 个发送的数据包的时间序列且 $t_1 < t_2 < \cdots < t_k < \cdots$，$\varepsilon((t_k+m)h) \in (0,1)$ 表示动态阈值参数，W>0 为权重矩阵。

本文提出如下动态阈值参数：

$$\varepsilon((k+1)h) = \frac{1}{1 + \|y(t_k h + mh)\| - \|y(t_k h)\|} \varepsilon_{\max} \tag{14}$$

其中 $\varepsilon_{\max}$ 为给定的最大触发阈值，是一个常数。

式(13)表示通过与前一时刻发送的数据包 $y(t_k h), t_k \in l$ 进行比较，从而决定当前时刻采集的数据包 $y(t_k h + mh), m \in \{1, 2, ...,\}$ 是否传输。

式(14)不难看出如果当前采得的输出信号与最近一次释放的数据差距很大，那么阈值会降低，更低的阈值意味着更多的数据需要被传输；反之，若两者相差很小，这意味着阈值接近最大值，此时传输的数据达到最小，整个过程是动态自适应的，我们会在仿真部分进行更为直观的展示。

不幸的是 DoS 攻击会干扰网络通道，在干扰时间间隔内拦截滤波器的输入信号，因此事件触发条件(13)不能直接使用，需要修改触发方案。设计事件触发条件如下：

$$t_{k,n}h = \{t_k h \text{满足}(13) \mid t_k h \in \Gamma_{1,n-1}\} \cup \{h_n\} \tag{15}$$

其中 $t_{0,n}h = h_0$。

记 $\delta_{t_{k,n}}, 0 \le \delta_{t_{k,n}} \le \bar{\delta}$ 为网络传输时刻 $t_{k,n}h$ 的网络时延。控制站在 $t_{k,n}h + \delta_{t_{k,n}}$ 时刻接收数据包并一直使用至 $t_{k+1,n}h + \delta_{t_{k+1,n}}$ 时刻，那么控制站收到的输出信号可以描述为：

$$\tilde{y}(t) = y(t_{k,n}h) \tag{16}$$

其中 $t \in [t_{k,n}h + \delta_{t_{k,n}}, t_{k+1,n}h + \delta_{t_{k+1,n}})$。

定义 $T_{k,n} = [t_{k,n}h + \delta_{t_{k,n}}, t_{k+1,n}h + \delta_{t_{k+1,n}})$， 并分割时间间隔 $T_{k,n}$ 如下：

$$T_{k,n} = \bigcup_{m=0}^{m_k} \theta_m \tag{17}$$

其中

$$\begin{aligned} &m_k = t_{k+1,n}h - t_{k,n}h - 1, \\ &\theta_0 = [t_{k,n}h + \delta_{t_{k,n}}, t_{k,n}h + \delta_{t_{k+1,n}} + h), \\ &\theta_m = [t_{k,n}h + \delta_{t_{k,n}} + mh, t_{k,n}h + \delta_{t_{k+1,n}} + (m+1)h), \\ &\theta_{m_k} = [t_{k,n}h + \delta_{t_{k,n}} + m_k h, t_{k+1,n}h + \delta_{t_{k+1,n}}) \end{aligned}$$

定义 $\delta_{k,n}(t)$ 和 $\eta_{k,n}(t)$ 分别为时延函数和误差函数，则

$$\begin{aligned} &\delta_{k,n}(t)=t-t_{k,n}h-mh \\ &\eta_{k,n}(t)=y(t_{k,n}h)-y(t_{k,n}h+mh) \end{aligned} \tag{18}$$

由(17)和(18)可知 $\delta_{k,n}(t)$ 为分段可微线性函数，且满足：

$$0\le\delta_{t_{k,n}}\le\delta_{k,n}(t)\le\max\left\{\delta_{t_{k,n}},\delta_{t_{k+1,n}}\right\}+h\le\bar{\delta}+h\triangleq\delta_M \tag{19}$$

其中 $\bar{\delta}$ 为网络时延上界，δ_M 为网络时延 δ 和采样周期 h 相关的上界参数。那么控制站接收到的输出信号为：

$$\tilde{y}(t)=y(t_{k,n}h)=y(t_{k,n}h+mh)+\eta_{k,n}(t) \tag{20}$$

2.2 故障检测滤波器与控制器协同设计

控制站由控制器和故障检测滤波器（FDF）组成。在 DoS 攻击干扰和执行器故障情况下本文采用以下基于观测器的 FDF 和控制器来产生残差信号和控制输入：

当 $t\in T_{k,n}\bigcap\Gamma_{1,n-1}$ 时，

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}(t)=A\hat{e}(t)+B\hat{u}(t)+L(\tilde{y}(t)-\hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t)=C\hat{e}(t) \\ r(t)=V(\tilde{y}(t)-\hat{y}(t)) \\ \hat{u}(t)=K\hat{e}(t) \end{cases} \tag{21a}$$

当 $t\in\Gamma_{2,n-1}$ 时，

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}(t)=A\hat{e}(t)+B\hat{u}(t)-L\hat{y}(t) \\ r(t)=-V\hat{y}(t)) \end{cases} \tag{21b}$$

其中 $\hat{e}(t)\in{}^{n}$，$\hat{y}(t)\in{}^{l}$，$r(t)\in{}^{r}$，$\hat{u}(t)\in{}^{m}$ 分别表示故障检测器的状态、输出、残差信号和控制输入。L，V，K 为可设置参数。(21a)和(21b)分别为无 DoS 攻击和有 DoS 攻击情况下的 FDF 与控制器协同设计，(21b)中的 $\hat{y}(t)$ 和 $\hat{u}(t)$ 同(21a)，故不再赘述。

无人水面艇的控制输入为

$$u(t)=\hat{u}(t)=K\hat{e}(t) \tag{22}$$

定义 $\varphi(t)=e(t)-\hat{e}(t)$，结合(12)，(21)和(22)可得

当 $t\in T_{k,n}\bigcap\Gamma_{1,n-1}$ 时，

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}(t)=(A-LC)\varphi(t)+LCe(\mathrm{t})-LCe(t \\ -\delta_{k,n}(\mathrm{t}))-L\eta(t)+Bf(t)+w(t) \end{aligned} \tag{23a}$$

当 $t\in\Gamma_{2,n-1}$ 时，

$$\dot{\varphi}(t)=(A-LC)\varphi(t)+Bf(t)+w(t) \tag{23b}$$

上式(23a)和(23b)分别是无 DoS 攻击和有 DoS 攻击情况下。

定义 $\phi(t)=\begin{bmatrix}\varphi^T(t) & e^T(t)\end{bmatrix}^T$，$\omega(t)=\begin{bmatrix}f^T(t) & w^T(t)\end{bmatrix}^T$，$r_e(t)=r(t)-f(t)$，结合(21)，(22)和(23)，可以得到如下网络化 USV 的闭环系统：

$$\begin{cases} \begin{cases} \dot{\phi}(t)=\Pi_1\varphi(t)+\Pi_2\varphi(t-\delta_{k,n}(t)) \\ \qquad +\Pi_3\eta(t)+\Pi_4\omega(t) \\ r_e(t)=\bar{C}_1\phi(t)+\bar{C}_2\phi(t-\delta_{k,n}(t)) \\ \qquad +\bar{C}_3\eta(t)+\bar{C}_4\omega(t) \end{cases} \text{无攻击} \\ \begin{cases} \dot{\phi}(t)=\Pi_1\varphi(t)+\Pi_4\omega(t) \\ r_e(t)=\bar{C}_1\phi(t)+\bar{C}_4\omega(t) \end{cases} \text{有攻击} \end{cases} \tag{24}$$

其中

$\Pi_1=\begin{bmatrix}A-LC & LC \\ -BK & A+BK\end{bmatrix}$，$\Pi_2=\begin{bmatrix}0 & -LC \\ 0 & 0\end{bmatrix}$，

$\Pi_3=\begin{bmatrix}-L \\ 0\end{bmatrix}$，$\Pi_4=\begin{bmatrix}B & I \\ B & I\end{bmatrix}$，$C_1=\begin{bmatrix}VC & -VC\end{bmatrix}$，

$C_2=\begin{bmatrix}0 & VC\end{bmatrix}$，$C_3=V$，$C_4=\begin{bmatrix}-I & 0\end{bmatrix}$

另外为了检测执行器故障，构建如下的残差评价函数：

$$J(t)=\left(\int_0^t r_e^T(s)r_e(s)ds\right)^{\frac{1}{2}} \tag{25}$$

残差评价函数阈值为：

$$J_{th}=\sup_{\omega(t)\in L_2,f(t)=0}J(t) \tag{26}$$

那么可以得到如下故障检测定律：

$$\begin{cases} J(t) > J_{th}，有故障 \\ J(t) \le J_{th}，无故障 \end{cases} \tag{27}$$

当检测出存在故障，会触发执行器报警，此时可以采取一些措施保证 USV 系统在网络环境下的航向安全。

以上，网络化 USV 闭环系统已经构造完毕，下一节我们将对闭环系统进行稳定性分析，并进行控制器和滤波器设计。

3 稳定性分析和控制器设计

本节主要针对第 2 节构造的网络化 USV 闭环系统的稳定性进行分析，并设计基于观测的 FDF 和控制器。在此之前，需用到以下引理和定义。

引理 1[27] 对于给定矩阵 $R>0$，在 $[a,b] \to \mathbb{R}^n$ 上的所有连续可微函数 ϕ 有以下不等式成立：

$$\int_a^b \dot{\phi}^T(s)R\dot{\phi}(s)ds \ge \frac{1}{b-a}(\phi(b)-\phi(a))^T R(\phi(b)-\phi(a)) + \frac{3}{b-a}\Omega^T R\Omega \tag{28}$$

其中 $\Omega = \phi(a)+\phi(b)-\frac{2}{b-a}\int_a^b \phi(s)ds$。

引理 2[28] 若对于给定矩阵 $R=R^T>0$，存在矩阵 $S \in \mathbb{R}^{n\times n}$ 使得 $\begin{bmatrix} R & * \\ S & R \end{bmatrix} \ge 0$。那么对 $\forall \tau \in (0,1)$ 有下列不等式成立：

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\tau}R & 0 \\ 0 & \frac{1}{1-\tau}R \end{bmatrix} \ge \begin{bmatrix} R & * \\ S & R \end{bmatrix} \tag{29}$$

上述引理用于闭环系统的全局指数稳定性分析。

引理 3[14] 给定 DoS 攻击参数 $\Delta_{\min}$，$d_{\max}$，$\tau_D \in \mathbb{R}_{>0}$，时延 δ_M>0，反馈增益矩阵 K，观测器增益矩阵 L，故障检测滤波器增益矩阵 V，以及常数 $\alpha_i \in (0,\infty)$，$\varepsilon_{\max} \in (0,1)$，考虑非周期 DoS 攻击(11)下的 $\omega(t)=0$ 的系统(24)，若存在正定对称矩阵 P_i，Q_i，R_i，$i \in \{1,2\}$ 和合适维度的矩阵 W，沿着闭环系统(24)的轨迹，有

$$V(t) \le \begin{cases} e^{-2\alpha_1(t-h_n)}V(h_n), t \in \Gamma_{1,n} \\ e^{2\alpha_2(t-h_n-\Delta_n)}V(h_n+\Delta_n), t \in \Gamma_{2,n} \end{cases} \tag{30}$$

定义 1[14] 若对 $\forall t \ge 0$，存在 $\sigma>0$，$\beta>0$ 使得 $\phi(t) \le \sigma^{-\beta t}\|Y_0\|_\delta$ 成立，则该系统指数稳定。其中 $\|Y_0\|_\delta = \sup_{-\delta\le t\le 0}\{\|\phi(t)\|,\|\dot{\phi}(t)\|\}$，$\beta$ 为衰减率。

3.1 稳定性分析

定理 1：给定 DoS 攻击参数 $\Delta_{\min}$，$d_{\max}$，$\tau_D \in \mathbb{R}_{>0}$，时延 δ_M>0，反馈增益矩阵 K，观测器增益矩阵 L，故障检测滤波器增益矩阵 V，以及常数 $\alpha_i \in (0,\infty)$，$\mu_i \in (0,\infty)$，$\varepsilon_{\max} \in (0,1)$，考虑非周期 DoS 攻击(11)下的 $\omega(t)=0$ 的系统(24)，若存在正定对称矩阵 P_i，Q_i，R_i，$i \in \{1,2\}$ 和合适维度的矩阵 W，使下列不等式成立：

$$P_1 \le \mu_2 P_2 \tag{31}$$

$$P_2 \le \mu_1 e^{2(\alpha_1+\alpha_2)\delta_M} P_1 \tag{32}$$

$$Q_i \le \mu_{3-i} Q_{3-i} \tag{33}$$

$$R_i \le \mu_{3-i} R_{3-i} \tag{34}$$

$$0 \le 2\rho = \frac{2\alpha_1\Delta_{\min} - 2(\alpha_1+\alpha_2)\delta_M - 2\alpha_2 d_{\max} - \ln(\mu_1\mu_2)}{\tau_D} \tag{35}$$

则系统(24)在所考虑的非周期 DoS 攻击(11)下是全局指数稳定的，其中 ρ 是系统(24)的衰减率。

证明：基于引理 2，本文构造下列分段 Lyapunov 函数：

$$V(t) \le \begin{cases} V_1(t), t \in T_{k,n} \cap \Gamma_{1,n} \\ V_2(t), t \in \Gamma_{2,n} \end{cases} \tag{36}$$

其中

$$\begin{aligned} V_i(t) &= \phi^T(t)P_i\phi(t) \\ &+ \int_{t-\delta_M}^t \phi^T(s)e^{2(-1)^i\alpha_i(t-s)}Q_i\phi(s)ds \\ &+ \delta_M\int_{-\delta_M}^0\int_{t+\theta}^t \dot{\phi}^T(s)e^{2(-1)^i\alpha_i(t-s)}R_i\dot{\phi}(s)dsd\theta \end{aligned}$$

由引理 1 和引理 2 计算可得

$$\begin{cases} V_1(h_n) \le \mu_2 V_2(h_n^-) \\ V_2(h_n+\Delta_n) \le \mu_1 e^{2(\alpha_1+\alpha_2)\delta_M} V_1((h_n+\Delta_n)^-) \end{cases} \tag{37}$$

那么由(33)可计算出 $V(t)$的估计值：

1）当 $t \in \Gamma_{1,n}$时，由假设 1，假设 2 和式(35)可得

$$V(t) \le V_1(0) e^{c_1} e^{-2\rho t} \tag{38}$$

其中

$c_1 = 2(\alpha_1+\alpha_2)\delta_M \hat{i} + 2\alpha_2 d_{\max}\hat{i} - 2\alpha_1 \Delta_{\min}\hat{i} + \ln(\mu_1+\mu_2)\hat{i}$。

2）当 $t \in \Gamma_{2,n}$时，同上可得

$$V(t) \le \frac{1}{\mu_2} V_1(0) e^{c_2} e^{-2\rho t} \tag{39}$$

其中

$c_2 = [2(\alpha_1+\alpha_2)\delta_M + 2\alpha_2 d_{\max} - 2\alpha_1 \Delta_{\min} + \ln(\mu_1+\mu_2)](\hat{i}+1)$

令 $\mu = \max\left\{ e^{c_1}, \dfrac{e^{c_2}}{\mu_2} \right\}$，

$\varpi_1 = \lambda_{\min}(P_i)$， $\varpi_2 = \lambda_{\max}(P_1)$，

$\varpi_3 = \varpi_2 + \delta_M \lambda_{\max}(Q_1) + \dfrac{\delta_M^3}{2}\lambda_{\max}(R_1)$，结合式(38)和(39)可得

$$V(t) \le \mu e^{-2\rho t} V_1(0) \tag{40}$$

为了保证一个理想系统性能，需要一个较大的衰减率 ρ。

根据 $V(t)$的定义可知

$$V(t) \ge \varpi_1 \|\phi(t)\|^2, \quad V_1(0) \le \varpi_3 \|Y_0\|_h^2 \tag{41}$$

那么结合式(37)和(38)可得

$$\|\phi(t)\| \le \sqrt{\frac{\mu\varpi_3}{\varpi_1}} e^{-\rho t} \|Y_0\|_h, \forall t \ge 0 \tag{42}$$

根据定义 1，系统(24)被证明是具有衰减率 ρ 的全局指数稳定。

3.2 H_∞ 性能分析

根据定理 1，下面给出闭环系统(24)的 H_∞ 干扰衰减指数 $\tilde{\gamma}$ 的充分条件。

定理 2： 给定 DoS 攻击参数 $\Delta_{\min}$， $d_{\max}$， $\tau_D \in {}_{>0}$，时延 δ_M>0，反馈增益矩阵 K，观测器增益矩阵 L，故障检测滤波器增益矩阵 V，以及常数 $\gamma \in (0,\infty)$，$\alpha_i \in (0,\infty)$，$\mu_i \in (0,\infty)$，$\varepsilon_{\max} \in (0,1)$，非周期 DoS 攻击(11)下的系统(24)全局指数稳定并具有指定的 H_∞ 干扰衰减指数 $\tilde{\gamma}$，若存在正定对称矩阵 P_i， Q_i， R_i，W>0 和合适维度的矩阵 S_i，$i \in \{1,2\}$，使式(31)-(35)成立，以及下列不等式成立：

$$\begin{bmatrix} \Lambda_1 & \Lambda_2 \\ * & \Lambda_3 \end{bmatrix} < 0 \tag{43}$$

$$\begin{bmatrix} \Theta_2 & e_1^T P_2 \Pi_4 & e_1^T \Pi_1^T & e_1^T \bar{C}_1^T \\ * & -\gamma^2 I & \Pi_4^T & \bar{C}_4^T \\ * & * & -(\delta_M^2 R)^{-1} & 0 \\ * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \tag{44}$$

其中

$$\Lambda_1 = \begin{bmatrix} \Theta_1 & e_1^T P_1 \Pi_3 & e_1^T P_1 \Pi_4 \\ * & -W & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix}$$

$$\Lambda_2 = \begin{bmatrix} e_1^T \Pi_1^T + e_2^T \Pi_2 & e_2^T H^T C^T & e_1^T \bar{C}_1^T + e_2^T \bar{C}_2^T \\ \Pi_3^T & I & \bar{C}_3^T \\ \Pi_4^T & 0 & \bar{C}_4^T \end{bmatrix}$$

$$\Lambda_3 = diag\left\{ -(\delta_M^2 R_1)^{-1}, -(\varepsilon_{\max} W)^{-1}, -I \right\}$$

$$\Theta_1 = e_1^T \left[sym(P_1\Pi_1) + P_1 + Q_1 \right] e_1 + sym(e_1^T P_1 \Pi_2 e_2) - e^{-2\alpha_1\delta_M} e_3^T Q_1 e_3 - e^{-2\alpha_1\delta_M} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \hat{R}_1 & S_1 \\ * & \hat{R}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}$$

$$\Theta_2 = e_1^T \left[sym(P_2\Pi_1) - P_2 + Q_2 \right] e_1 - e^{-2\alpha_2\delta_M} e_3^T Q_2 e_3 - \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \hat{R}_2 & S_2 \\ * & \hat{R}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}$$

$$e_1 = \begin{bmatrix} I_{6\times6} & 0_{6\times24} \end{bmatrix}$$

$$e_2 = \begin{bmatrix} 0_{6\times6} & I_{6\times6} & 0_{6\times18} \end{bmatrix}$$

$$e_3 = \begin{bmatrix} 0_{6\times12} & I_{6\times6} & 0_{6\times12} \end{bmatrix}$$

$$e_4 = \begin{bmatrix} 0_{6\times18} & I_{6\times6} & 0_{6\times6} \end{bmatrix}$$

$$e_5 = \begin{bmatrix} 0_{6\times24} & I_{6\times6} \end{bmatrix}$$

$$\xi_1 = \begin{bmatrix} e_1 - e_2 \\ e_1 + e_2 - e_4 \end{bmatrix}, \quad \xi_2 = \begin{bmatrix} e_2 - e_3 \\ e_2 + e_3 - e_5 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 & I \end{bmatrix}, \quad \hat{R}_i = diag\begin{bmatrix} R_i & 3R_i \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\gamma} = \sqrt{\frac{F_1}{F_2}}\gamma,$$

$F_1=\min\left\{\mu_2^{-1},1\right\}$，$F_2=\max\left\{\mu_2^{-1}e^{2\alpha_1\Delta_{\max}},e^{2\alpha_1 d_{\max}}\right\}$
则非周期 DoS 攻击(11)下的系统(24)全局指数稳定并具有指定的 H_∞ 干扰衰减指数 $\tilde{\gamma}$。

证明：基于式(36)构造的分段 Lyapunov 函数来分析 $\omega(t)\neq 0$ 的闭环系统(24)的 H_∞ 性能，需满足以下不等式：

对于 $t\in T_{k,n}\bigcap\Gamma_{1,n}$，

$$\dot{V}_1(t)+2\alpha_1V_1(t)+r_e^T(t)r_e(t)-\gamma^2\omega^T(t)\omega(t)\le 0 \tag{45}$$

对于 $t\in\Gamma_{2,n}$，

$$\dot{V}_2(t)-2\alpha_2V_2(t)+r_e^T(t)r_e(t)-\gamma^2\omega^T(t)\omega(t)\le 0 \tag{46}$$

根据式(36)，可得

$$\begin{aligned}\dot{V}_1(t)&=2\phi^T(t)P_1\dot{\phi}(t)+\phi^T(t)Q_1\phi(t)-\phi^T(t-\delta_M)\\&\quad\times e^{-2\alpha_1\delta_M}Q_1\phi(t)+\delta_M^2\dot{\phi}^T(t)R_1\dot{\phi}(t)\\&\quad-\delta_M\int_{t-\delta_M}^{t}\dot{\phi}^T(s)e^{-2\alpha_1\delta_M}R_1\dot{\phi}(s)ds\\&\quad-2\alpha_1V_1(t)+\phi^T(t)P_1\phi(t)\\&\le 2\phi^T(t)P_1(\Pi_1\phi(t)+\Pi_2\phi(t-\delta_{k,n}(t)+\Pi_3\eta_{k,n}(t)\\&\quad+\Pi_4\omega(t))+\phi^T(t)Q_1\phi(t)-e^{-2\alpha_1\delta_M}\phi^T(t-\delta_M)\\&\quad\times Q_1\phi(t-\delta_M)+\delta_M^2\dot{\phi}^T(t)R_1\dot{\phi}(t)-e^{-2\alpha_1\delta_M}\\&\quad\times\Big[(\phi(t)-\phi(t-\delta_M))^TR_1(\phi(t)-\phi(t-\delta_M))\\&\quad+(\phi(t)+\phi(t-\delta_{k,n}(t))-\frac{2}{\delta_M}\int_{t-\delta_M}^{t}\phi(s)ds)^T3R_1\\&\quad\times(\phi(t)+\phi(t-\delta_{k,n}(t))-\frac{2}{\delta_M}\int_{t-\delta_M}^{t}\phi(s)ds)\Big]\\&\quad-2\alpha_1V_1(t)+\phi^T(t)P_1\phi(t)\end{aligned} \tag{47}$$

令

$$l^T(t)=\Big[\phi(t)\quad \phi(t-\delta_{k,n}(t))\quad \phi(t-\delta_M)\quad \frac{2}{\delta(t)}\int_{t-\delta_{k,n}(t)}^{t}\phi(s)ds\quad \frac{2}{\delta_M-\delta_{k,n}(t)}\int_{t-\delta_M}^{t-\delta_{k,n}(t)}\phi(s)ds$$

根据引理 2，有

$$\begin{aligned}&\dot{V}_1(t)+r_e^T(t)r_e(t)-\gamma^2\omega^T(t)\omega(t)+2\alpha_1V_1(t)\\&\le l^T(t)\Big[2e_1^TP_1\big(\Pi_1e_1+\Pi_2e_2+\Pi_3\eta_{k,n}(t)+\Pi_4\omega(t)\big)\\&\quad+e_1^TP_1e_1+e_1^TQ_1e_1-e^{-2\alpha_1\delta_M}e_3^TQ_1e_3\Big]l(t)\\&\quad-\delta_M^2\dot{\phi}^T(t)R_1\dot{\phi}(t)-e^{-2\alpha_1\delta_M}l^T(t)\begin{bmatrix}\xi_1\\\xi_2\end{bmatrix}^T\begin{bmatrix}\hat{R}_1 & S_1\\ * & \hat{R}_1\end{bmatrix}\\&\quad\times\begin{bmatrix}\xi_1\\\xi_2\end{bmatrix}l(t)-\eta_{k,n}^T(t)W\eta_{k,n}(t)+\eta_{k,n}^T(t)W\eta_{k,n}(t)\\&\quad+r_e^T(t)r_e(t)-\gamma^2\omega^T(t)\omega(t)\end{aligned} \tag{48}$$

另外，根据(13)和(15)可得下列不等式

$$\begin{aligned}\eta_{k,n}^T(t)\,\mathrm{W}\,\eta_{k,n}(t)&\le\varepsilon_{\max}\Big[\eta_{k,n}(t)+CH\phi(t-\delta_{k,n}(t))\Big]^T\\&\quad\times W\Big[\eta_{k,n}(t)+CH\phi(t-\delta_{k,n}(t))\Big]\end{aligned} \tag{49}$$

通过舒尔补引理和(46)，条件(40)可以保证 $\dot{V}_1(t)+2\alpha_1V_1(t)+r_e^t(t)r_e(t)-\gamma^2\omega^T(t)\omega(t)<0$，那么条件(45)成立。同样，如果条件(44)成立，那么条件(46)成立。

另外，由(35)可得

$$\mu_2^{-1}e^{2\alpha_1\Delta_{\min}}-\mu_1e^{2(\alpha_1+\alpha_2)\delta+2\alpha_2d_{\max}}\ge 0 \tag{50}$$

定义 $\tilde{F}_1(n)=\mu_2^{-1}e^{2\alpha_1(t-h_n)}$，$\tilde{F}_2(n)=e^{-2\alpha_2(t-h_{n+1})}$

对于 $t\in\left[0,h_{n+1}\right)$，有

$$\begin{aligned}&\sum_{l=0}^{n}\int_{h_l}^{h_l+\Delta_l}\tilde{F}_1(l)\Big[\gamma^2\omega^T(t)\omega(t)-r_e^T(t)r_e(t)\Big]dt\\&+\sum_{l=0}^{n}\int_{h_l+\Delta_l}^{h_{l+1}}\tilde{F}_2(l)\Big[\gamma^2\omega^T(t)\omega(t)-r_e^T(t)r_e(t)\Big]dt>0\end{aligned} \tag{51}$$

那么显然，对于 $t\in\left[h_k,h_k+\Delta_k\right)$，

$$\begin{aligned}&1\le e^{2\alpha_1(t-h_k)}\le e^{2\alpha_1\Delta_k}\le e^{2\alpha_1\Delta_{\max}}\\&1\le e^{-2\alpha_2(t-h_{k+1})}\le e^{-2\alpha_2(h_k+\Delta_k-h_{k+1})}\le e^{2\alpha_2d_{\max}}\end{aligned} \tag{52}$$

考虑零初始条件下，结合(45)和(46)，对于 $\left[0,h_{n+1}\right),n\to\infty$，可得到下列不等式：

$$\int_0^\infty r_e^T(t)r_e(t)dt\le\tilde{\gamma}^2\int_0^\infty\omega^T(t)\omega(t)dt \tag{53}$$

由此可知$\left\| r_e(t) \right\|_2 \le \tilde{\gamma} \left\| \omega(t) \right\|_2 , \omega(t) \in l_2 \left[0,\infty \right)$，因此所考虑的非周期 DoS 攻击(11)下的闭环系统(24)指数稳定，且保证H_∞性能。同时，$\tilde{\gamma}$越小，系统H_∞性能越好。

3.3 控制器设计

接下来，我们设计基于观测器的 FDF 和控制器。

定理 3：给定 DoS 攻击参数$\Delta_{\min}$，$d_{\max}$，$\tau_D \in {}_{>0}$，时延δ_M>0，反馈增益矩阵 K，观测器增益矩阵 L，故障检测滤波器增益矩阵 V，以及常数$\gamma \in (0,\infty)$，$\alpha_i \in (0,\infty)$，$\mu_i \in (0,\infty)$，$\varepsilon_{\max} \in (0,1)$，若存在正定对称矩阵$U_{11i}$，$U_{22i}$，$\tilde{Q}_i$，$\tilde{R}_i$，$\tilde{W} > 0$和合适维度的矩阵$\tilde{S}_i$，$\Sigma_{ji}$，$i \in \left\{1,2\right\}$，$j \in \left\{1,2,3\right\}$使下列不等式成立：

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Lambda}_1 & \tilde{\Lambda}_2 \\ * & \tilde{\Lambda}_3 \end{bmatrix} < 0 \tag{54}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Lambda}_4 & \tilde{\Lambda}_5 \\ * & \tilde{\Lambda}_6 \end{bmatrix} < 0 \tag{55}$$

其中

$$\tilde{\Lambda}_1 = \begin{bmatrix} \tilde{\Theta}_1 & e_1^T \tilde{\Pi}_3 & e_1^T \Pi_4 \\ * & -\tilde{W} & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Lambda}_2 = \begin{bmatrix} e_1^T \tilde{\Pi}_{11}^T + e_2^T \tilde{\Pi}_2^T & e_2^T \tilde{H}^T C^T & e_1^T \tilde{C}_{11}^T + e_2^T \tilde{C}_2^T \\ \tilde{\Pi}_3^T & \tilde{U}_1 & \tilde{C}_3^T \\ \Pi_4^T & 0 & \bar{C}_4^T \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Lambda}_3 = diag\left\{ \frac{1}{\delta_M^2}(\tilde{R}_1 - 2\tilde{U}_1), \frac{1}{\varepsilon_{\max}}(\tilde{W} - 2\tilde{U}_1), -I \right\}$$

$$\tilde{\Lambda}_4 = \begin{bmatrix} \tilde{\Theta}_2 & e_1^T \Pi_4 \\ * & -\gamma^2 I \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Lambda}_5 = \begin{bmatrix} e_1^T \tilde{\Pi}_{12}^T & e_1^T \tilde{C}_{12}^T \\ \Pi_4^T & \bar{C}_4^T \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Lambda}_6 = diag\left\{ \frac{1}{\delta_M^2}(\tilde{R}_2 - 2\tilde{U}_2), -I \right\}$$

$$\tilde{\Theta}_1 = e_1^T \left[sym(\tilde{\Pi}_{11}) + \tilde{U}_1 + \tilde{Q}_1 \right] e_1 + sym(e_1^T \tilde{\Pi}_2 e_2) - e^{-2\alpha_1 \delta_M} e_3^T \tilde{Q}_1 e_3 - e^{-2\alpha_1 \delta_M} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tilde{R}_1 & \tilde{S}_1 \\ * & \tilde{R}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Theta}_2 = e_1^T \left[sym(\tilde{\Pi}_{12}) - \tilde{U}_2 - \tilde{Q}_2 \right] e_1 - e^{-2\alpha_2 \delta_M} e_3^T \tilde{Q}_2 e_3 - \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tilde{R}_2 & \tilde{S}_2 \\ * & \tilde{R}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Pi}_{11} = \begin{bmatrix} AU_1 - \Sigma_{21} C & \Sigma_{21} C \\ -B\Sigma_{11} & AU_1 + B\Sigma_{11} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Pi}_{12} = \begin{bmatrix} AU_2 - \Sigma_{22} C & \Sigma_{22} C \\ -B\Sigma_{12} & AU_2 + B\Sigma_{12} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Pi}_2 = \begin{bmatrix} 0 & -\Sigma_2 C \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \qquad \tilde{\Pi}_3 = \begin{bmatrix} -\Sigma_2 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{C}_{11} = \begin{bmatrix} \Sigma_{31} C & \Sigma_{31} C \end{bmatrix} \qquad \tilde{C}_{12} = \begin{bmatrix} \Sigma_{32} C & \Sigma_{32} C \end{bmatrix}$$

$$\tilde{C}_2 = \begin{bmatrix} 0 & \Sigma_3 C \end{bmatrix} \qquad \tilde{C}_3 = \Sigma_3$$

$$U_1 = Z_1^T U_{111} Z_1 + Z_2^T U_{221} Z_2$$

$$\tilde{U}_1 = diag\left\{ U_1, U_1 \right\}$$

$$\bar{U}_1 = O^{-1} X^{-1} U_{111} X O$$

$$U_2 = Z_1^T U_{112} Z_1 + Z_2^T U_{222} Z_2$$

$$\tilde{U}_2 = diag\left\{ U_2, U_2 \right\}$$

$$\bar{U}_2 = O^{-1} X^{-1} U_{112} X O$$

则非周期 DoS 攻击(11)下的系统(24)全局指数稳定并具有指定的H_∞干扰衰减指数$\tilde{\gamma}$。并且基于观测器的 FDF 和控制器的增益由下式给出：

$$\begin{aligned} K &= U_1^{-1} \Sigma_{11} \\ L &= \bar{U}_1^{-1} \Sigma_{21} \\ V &= \bar{U}_1^{-1} \Sigma_{31} \end{aligned} \tag{56}$$

证明：令$P_i = diag\left\{ \tilde{P}_i, \tilde{P}_i \right\}$，定义$U_i = \tilde{P}_i^{-1}$，$U_i Q_i U_i = \tilde{Q}_i$，$U_i R_i U_i = \tilde{R}_i$，$U_i W U_i = \tilde{W}$，$U_i S_i U_i = \tilde{S}_i$。对于$U_i = Z \begin{bmatrix} U_{11i} & * \\ 0 & U_{22i} \end{bmatrix} Z^T$，根据文献[29]可知存在$\bar{U}_i = OXU_{11i} X^{-1} O^{-1}$使得$CU_i = \bar{U}_i C$，其中$\bar{U}_i^{-1} = OXU_{11i}^{-1} X^{-1} O^{-1}$，$O$，$Z$ 为奇异值分解的正交矩阵，X 为非奇异值。式(43)和(44)左右分别乘以$diag\left\{ \tilde{U}_1, \tilde{U}_1, \tilde{U}_1, \tilde{U}_1, \tilde{U}_1, \bar{U}_1, I, I, I, I \right\}$和$diag\left\{ \tilde{U}_2, \tilde{U}_2, \tilde{U}_2, \tilde{U}_2, \tilde{U}_2, I, I, I \right\}$，就可以分别得到式(54)和(55)。证明完毕。

4 网络化无人艇仿真实例

本节以 DoS 攻击下的网络化 USV 系统为例，验证所提出的基于自适应事件触发的 FDF 和控制器设计方法的有效性。本文目的是使偏航速度跟踪参考信号，抑制偏航速度误差和偏航角，同时检测故障的发生和位置。根据文献[25]，USV 系统参数如下：

$$M=\begin{bmatrix}1.0852 & 0 & 0\\ 0 & 2.0575 & -0.4087\\ 0 & -0.4087 & 0.2153\end{bmatrix}$$

$$N=\begin{bmatrix}0.0865 & 0 & 0\\ 0 & 0.0762 & 0.0151\\ 0 & 0.0151 & 0.031\end{bmatrix} \tag{57}$$

$$G=\begin{bmatrix}0.0389 & 0 & 0\\ 0 & 0.0266 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

令 $A=-M^{-1}N$， $B=M^{-1}$，有

$$A=\begin{bmatrix}-0.0797 & 0 & 0\\ 0 & -0.0818 & -0.0577\\ 0 & -0.2254 & -0.2535\end{bmatrix}$$

$$B=\begin{bmatrix}0.9215 & 0 & 0\\ 0 & 0.7802 & 1.4811\\ 0 & 1.4811 & 7.4562\end{bmatrix} \tag{58}$$

$$C=I$$

我们给定 DoS 攻击参数 $\Delta_{\min}=1.8s$，$d_{\max}=0.5s$，$\tau_D=1.15s$，参数 $\mu_1=\mu_2=1.04$， $\alpha_1=0.018$，$\alpha_2=0.043$， $\delta_M=0.1s$， $h=0.01s$， $\gamma=\sqrt{10}$ $\varepsilon_{\max}=0.15$。

基于观测器的 FDF 和控制器的增益可由定理 3 求解得到：

$$K=\begin{bmatrix}-8.0747 & 0 & 0\\ 0 & -15.8615 & 3.3874\\ 0 & 2.6006 & -1.5022\end{bmatrix}$$

$$L=\begin{bmatrix}0.5828 & 0 & 0\\ 0 & 0.5745 & -0.0024\\ 0 & 0.0007 & 0.5872\end{bmatrix}$$

$$V=10^{-4}\times\begin{bmatrix}0.0205 & 0 & 0\\ 0 & 0.0147 & 0.0344\\ 0 & 0.0261 & 0.1715\end{bmatrix}$$

前向、横向、偏航方向的扰动如图 3 给出。

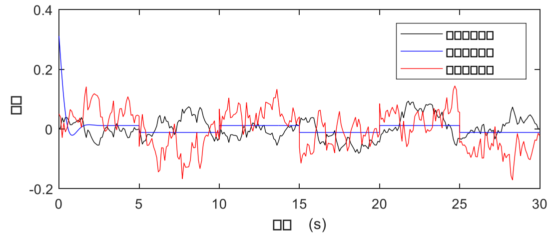

图 3 外部干扰

为了说明所提出的故障检测滤波器和控制器协同设计方法能够在网络环境下有效控制 USV 系统航向，我们首先考虑不存在执行器故障的情况，网络化 USV 系统在航向中会受到外部干扰和 DoS 攻击。图 4 表示 DoS 攻击序列，其中数字 1 表示攻击发生，0 表示没有攻击的正常情况。图 5a-5e 均为图 4 所示的 DoS 攻击下的响应。如图 5a 和图 5b 所示，偏航速度误差和偏航角幅值都得到了有效减少，图 5c 表示航向上的控制信号。如图 5d 和图 5e 所示，前向速度和横向速度都得到了有效的控制。另外，图 6a 和图 6b 分别为 DoS 攻击下的动态触发阈值和释放时间间隔，从图 6c 可知经过事件触发后的输出信号极大减少，节省网络资源。结果表明，该方法确实能对 USV 系统进行有效的航向控制。

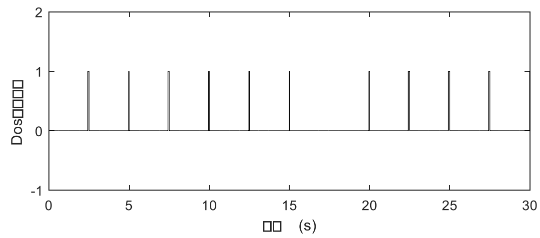

图 4 DoS 攻击序列

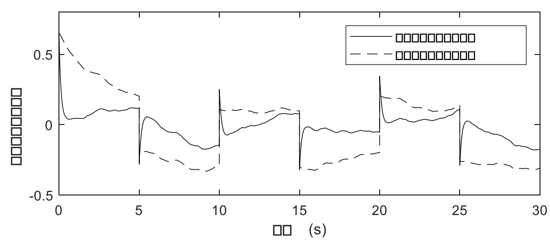

图 5a 偏航速度误差响应

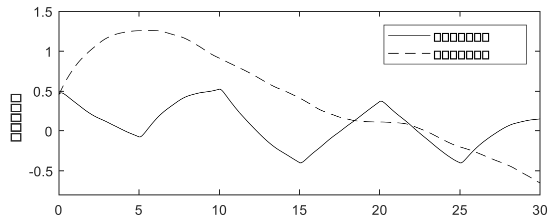

图 5b 偏航角响应

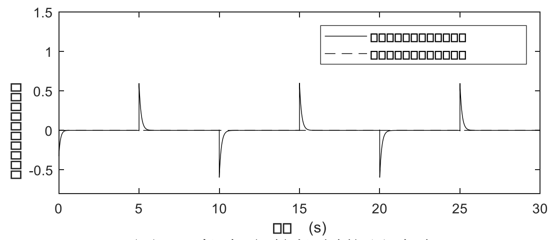

图 5c 航向上的控制信号响应

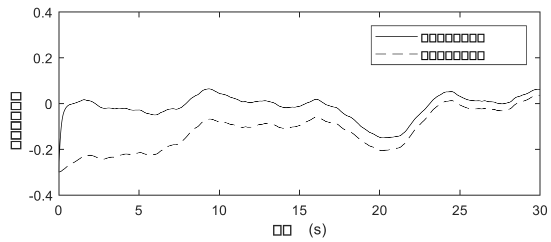

图 5d 前向速度响应

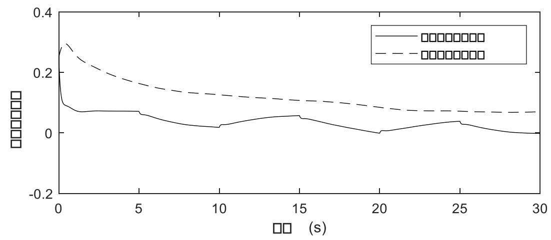

图 5e 横向速度响应

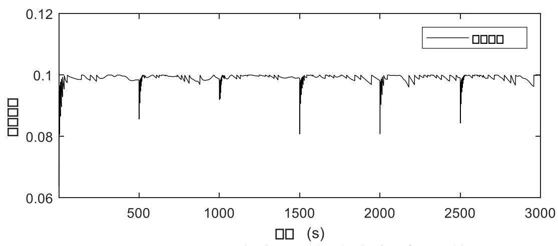

图 6a DoS 攻击下的动态触发阈值

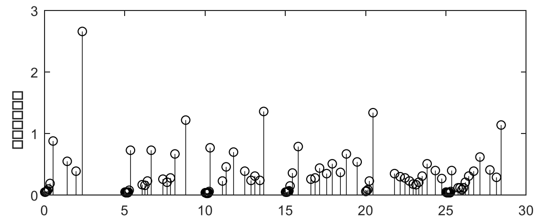

图 6b DoS 攻击下的释放时间间隔

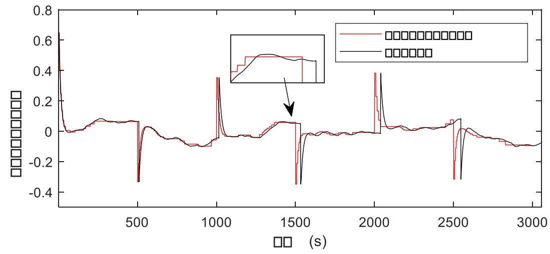

图 6c 偏航方向的输出信号

为了说明本文的方法可以检测执行器的故障，我们将执行器故障信号 $f_1(t)$ 描述为以下形式：

$$f_1(t)=\begin{cases}-0.1, t\in[5s, 6.5s]\\ 0,\text{其他}\end{cases}$$

图 7a 和 7b 说明故障发生时 USV 系统仍能保证航向控制稳定。由图 8a 可知执行器故障信号 $f(t)$ 的发生对残差信号有及时的影响，说明本文方法不仅可以检测出故障的发生，还能检测故障发生在哪个通道上，图 8a 即为横向方向上的故障。由图 8b 可知当残差评价函数超过阈值会立即触发执行器报警，此时可以采取一些措施保证 USV 系统在网络环境下的航向安全。

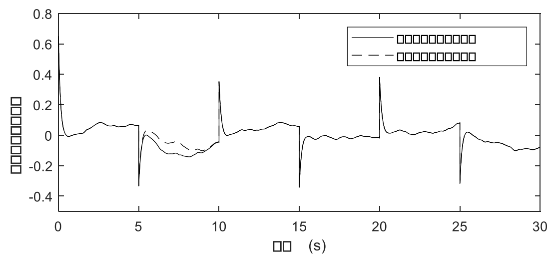

图 7a 有无故障下的偏航速度误差响应

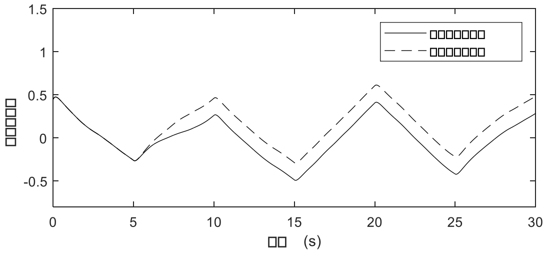

图 7b 有无故障下的偏航角响应

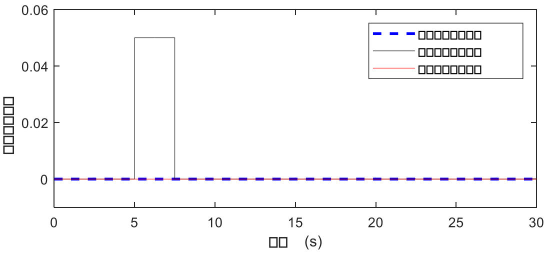

图 8a $f_1(t)$**下的残差信号响应**

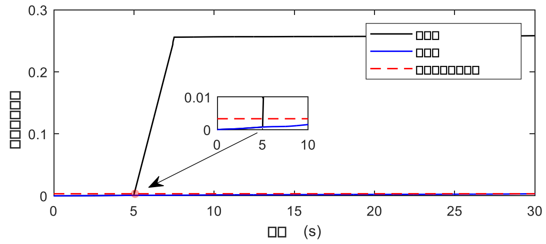

图 8b $f_1(t)$**下的残差评价函数**

为了进一步证明所提出的方法确实可以检测故障，我们设置如下执行器故障信号 $f_2(t)$：

$$f_2(t)=\begin{cases}-0.1\sin(t), t\in[10s,12.5s]\\ 0,\text{其他}\end{cases}$$

由图 9a 和 9b 可知故障发生时 USV 系统仍能保证航向控制稳定，由图 10a 和图 10b 可知该方法能及时检测出故障并判断出是偏航方向上的故障，当残差评价函数超过阈值立即触发执行器报警。由此，一旦执行器发生故障，即使网络通道中存在 DoS 攻击，基于观测的故障检测滤波器仍能及时准确地检测出故障信号，保证 USV 系统安全。

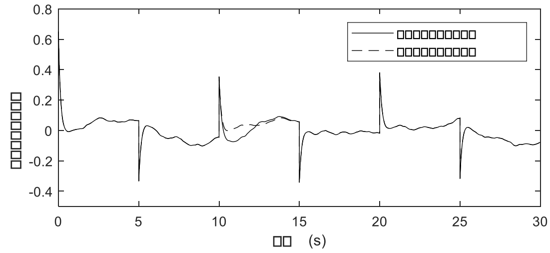

图 9a 有无故障下的偏航速度误差响应

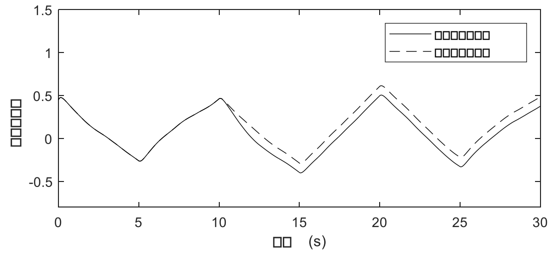

图 9b 有无故障下的偏航角响应

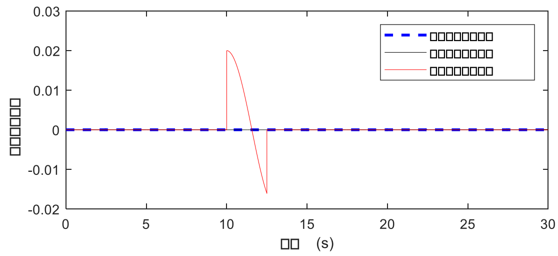

图 10a $f_2(t)$**下的残差信号响应**

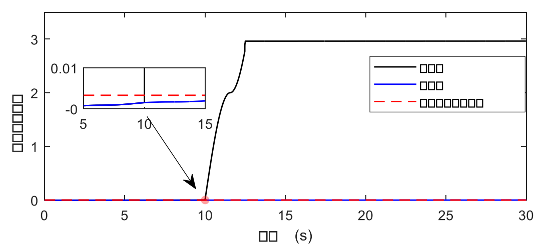

图 10b $f_2(t)$**下的残差评价函数**

接下来，为了证明本文提出的动态阈值事件触发机制能有效减少触发次数，节省网络资源，我们与文献[14]的恒定阈值事件触发进行比较。图 11 比较了两种阈值方案的触发阈值，图 12a 和 12b 分别展示了动态阈值和恒定阈值的释放时间间隔，统计得到动态阈值的释放次数为 125，恒定阈值的释放次

数为 143。同时，由图 13a 和图 13b 可以发现动态阈值方案在更少的触发次数下仍能保证对 USV 系统的控制性能。

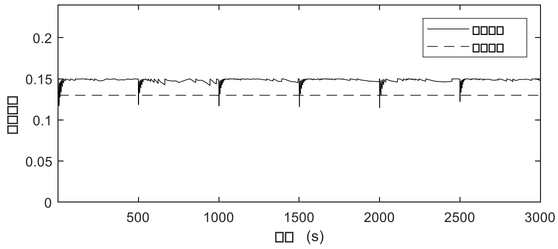

图 11 两种阈值的触发阈值

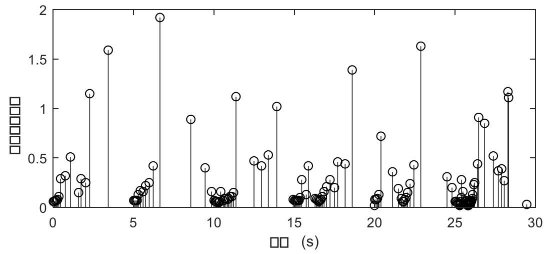

图 12a 动态阈值的释放时间间隔

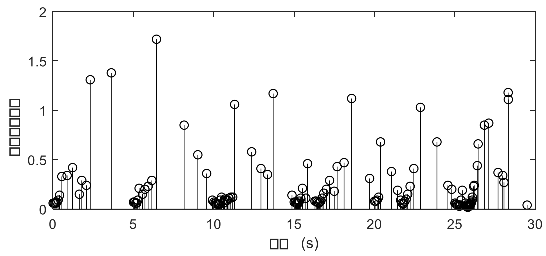

图 12b 恒定阈值的释放时间间隔

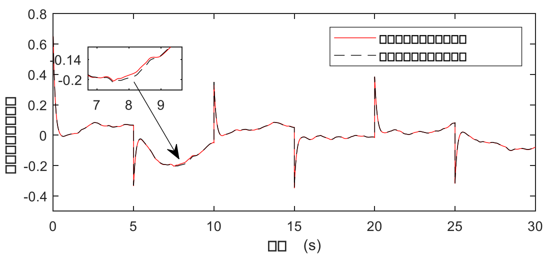

图 13a 两种阈值的偏航速度误差

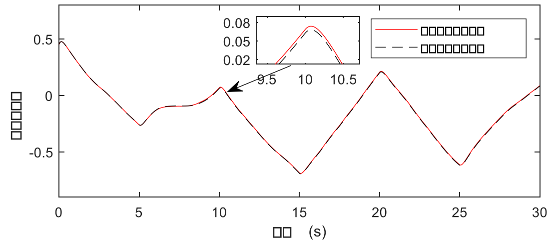

图 13b 两种阈值的偏航角

综上，本文所提出的基于自适应事件触发的故障检测滤波器和控制器方法，不仅可以对受 DoS 攻击和执行器故障的网络化 USV 系统进行有效控制，而且可以通过减少触发次数来节省网络资源。

5 结论

针对网络能力受限和非周期 DoS 攻干扰的网络化 USV 系统，本文提出一种基于自适应事件触发的故障检测滤波器和控制器的设计方法，可以在节省网络资源的情况下对 USV 系统进行有效地控制，并快速检测执行器故障的发生和位置。未来可以考虑无人水面艇群的协同控制和故障检测。

参考文献

[1] Mario N H, Gallego A J, Pablo G, et al. Two stage convolutional neural network for ship and spill detection using SLAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(9): 5217–5230

[2] Ma H J, Smart E, Adeel A, et al. Radar image-based positioning for USV under GPS denial environment[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, 19(1): 72-88

[3] Sohn S I, Oh J H, Lee Y S, et al. Design of a fuel-cell-powered catamaran-type unmanned surface vehicle[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2015, 40(2): 388–396

[4] Wang N, Er M J, Sun J C, et al. Adaptive Robust Online Constructive Fuzzy Control of a Complex Surface Vehicle System [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, 46(7): 1511-1523

[5] Liu L, Wang D, Peng Z H, et al. State recovery and disturbance estimation of unmanned surface vehicles based on nonlinear extended state observers[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 171: 625– 632

[6] Wang Y L, Han Q L, et al. Network-Based Fault Detection Filter and Controller Coordinated Design for

Unmanned Surface Vehicles in Network Environments[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(5): 1753-1765

[7] Zhou Z T, Zhong M Y, Wang Y Q, et al. Fault Diagnosis Observer and Fault-Tolerant Control Design for Unmanned Surface Vehicles in Network Environments[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 173694-173702

[8] Wang R Q, Li D L, Miao K Y, et al. Optimized Radial Basis Function Neural Network Based Intelligent Control Algorithm of Unmanned Surface Vehicles[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(3): 210-223

[9] Ge X H, Han Q L, and Wang Z D, et al. A dynamic event-triggered transmission scheme for distributed set-membership estimation over wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(1): 171–183

[10] ARAUJO J, MAZO M, ANTA A, et al. System architectures, protocols and algorithms for aperiodic wireless control systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 10(1): 175-184

[11] Chen Z R, Zhang B Y, Li Y M, et al. Design of event-triggered networked control systems via specific triggering quantizer[J]. *International journal of robust and nonlinear control*, 2020, 30(16): 6947-6960

[12] Meng X Y, Chen T W, et al. Optimal sampling and performance comparison of periodic and event based impulse control[J]. *IEEE transactions on automatic control*, 2012, 57(12): 3252–3259

[13] Peng G F, Peng K, et al. An H∞ Output Tracking Control Approach to Sampled-Data Control for Nonlinear Networked Control Systems[J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 143644-143653

[14] 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*, 2020, 22(3): 1–13

[15] Zhang H, Wang Z P, Yan H C, et al. Adaptive event-triggered transmission scheme and H∞ filtering co-design over a filtering network with switching topology[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2019, 49(12): 4296-4307

[16] Wang L Y, Lim C C, Shi P, et al. Adaptively adjusted event-triggering mechanism on fault detection for networked control systems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(8):2299-2311

[17] Zhang D, Ye Z H, Chen P C, et al. Intelligent event-based output feedback control with q-learning for unmanned marine vehicle systems[J]. *Control Engineering Practice*, 2020, 105: 104616-104628

[18] Abdi F, Chen C Y, Hasan M, et al. Preserving physical safety under cyber attacks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(4): 6285–6300

[19] Tian E, Wang X M, Peng C, et al. Probabilistic-Constrained Distributed Filtering for a Class of Nonlinear Stochastic Systems Subject to Periodic DoS Attacks[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2020, 67(12): 5369-5379

[20] Zhu Y Z, Zheng W X, et al. Observer-based control for cyber-physical systems with periodic DoS attacks via a cyclic switching strategy[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(8): 3714-3721

[21] Guo L, Yu H, Hao F. Event-triggered control for stochastic networked control systems against Denial-of-Service attacks[J]. *Information Sciences*, 2020, 527: 51-69

[22] Yue M, Wu Z J, Wang J J, et al. Detecting LDoS attack bursts based on queue distribution[J]. *IET Information Security*, 2019, 13(3): 285-292

[23] Yuan H H, Xia Y Q, Yang H J, et al. Resilient State Estimation of Cyber-Physical System with Multichannel Transmission Under DoS Attack[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 1-12

[24] Liu J J, Wang Y D, Cao J D, et al. Secure Adaptive-Event-Triggered Filter Design With Input Constraint and Hybrid Cyber Attack[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics,* 2020, PP: 1-11

[25] Ye Z H, Zhang D, Wu Z G, et al. Adaptive event-based tracking control of unmanned marine vehicle systems with DoS attack[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, 358(3): 1915-1939

[26] Pan Y N, Yang G H, et al. Event-Triggered Fault Detection Filter Design for Nonlinear Networked Systems[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, 48(11): 1851-1862

[27] Seuret A, Gouaisbaut F, et al. Wirtinger-based integral inequality: Application to time-delay systems[J]. *Automatica(Oxford)*, 2013, 49(9): 2860–2866

[28] Park P G, Wan K J, et al. Reciprocally convex approach to stability of systems with time-varying delays[J]. *Automatica(Oxford)*, 2011, 47(1): 235-238

[29] Chen P, Ma S D, Xie X P, et al. Observer-Based Non-PDC Control for Networked T–S Fuzzy Systems With an Event-Triggered Communication[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2017, 47(8): 2279-2287

Unmanned surface vehicles heading control and fault detection under DoS attack based on adaptive event-triggering

ZHAO Yun-bo   Wang Lingren   Ye Zehua

（College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology Hangzhou 310000）

Abstract

For a networked USV control system with limited network capability and aperiodic DoS attack jamming, a design method of fault detection filter and controller based on adaptive event-triggering mechanism is proposed. Firstly, construct a USV control system, which considers the aperiodic DoS attack, external interference and actuator faults. Secondly, for the networked USV system, an adaptive event-triggering mechanism is proposed to dynamically update the trigger threshold to reduce the waste of network resources. Thirdly, by constructing a piecewise Lyapunov function, it is shown that the closed-loop system is globally exponentially stable and has the specified H_∞ disturbance attenuation index, then design fault detection filter and controller based on observation. Finally, the effectiveness of the method is verified by simulation. The result shows that this method can not only effectively control the heading of USV system, but also detect the occurrence and location of actuator faults while saving network resources.

Key words： Unmanned Surface Vehicles(USV), Networked control system (NCS), DoS attack, Adaptive event triggering, Fault detection filter(FDF)