



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 116996297 A

(43) 申请公布日 2023. 11. 03

(21) 申请号 202310979596.3

(22) 申请日 2023.08.06

(71) 申请人 哈尔滨理工大学

地址 150080 黑龙江省哈尔滨市南岗区学府路52号

(72) 发明人 黄玲 刘梦昕

(51) Int. Cl.

H04L 9/40 (2022.01)

H04L 41/14 (2022.01)

权利要求书4页 说明书14页 附图3页

(54) 发明名称

一种受DoS攻击的离散复杂网络事件触发有限时间同步控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种受DoS攻击的离散复杂网络事件触发有限时间同步控制方法。该方法首先建立一个含有N个节点的离散复杂网络系统的同步误差模型；考虑DoS攻击的影响，对DoS攻击进行建模；引入事件触发条件，建立DoS攻击下含有N个节点的事件触发同步误差模型；基于Lyapunov稳定性定理、Schur补引理以及不等式变换技术，得到该离散时间复杂网络同步误差系统有限时间稳定的充分条件；求解线性矩阵不等式，获得控制器增益与事件触发参数。本发明提供的控制器可以有效降低离散复杂网络中DoS攻击的影响，保证了系统的安全性能，并且选用有限时间的同步标准，更加贴合实际工程需求。



1. 一种受DoS攻击的离散复杂网络事件触发有限时间同步控制方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1:建立有N个节点的离散复杂网络的同步误差模型;

S2:考虑周期DoS攻击对系统的影响,对周期DoS攻击建模;

S3:设计事件触发条件,并引入到同步误差模型中,建立周期DoS攻击下基于事件触发的N个节点离散复杂网络的同步误差模型;

S4:选取Lyapunov函数,基于Lyapunov稳定性理论、有限时间同步方法,采用Schur补引理及不等式放缩技术等,得到使得同步误差模型有限时间有界的充分条件;

S5:对线性矩阵不等式求解,得到满足离散复杂网络有限时间同步的控制器增益矩阵和事件触发参数;

所述的S1中,建立有N个节点的离散复杂网络的系统模型:

$$x_i(k+1) = Ax_i(k) + f(x_i(k)) + \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \Gamma x_j(k) + u_i(k) \quad i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

其中,A为已知适当维数的矩阵, $i=1,2,\dots,N$ ;  $x_i(t) \in \mathbb{R}^n$ 为系统状态向量;  $u_i(k) \in \mathbb{R}^n$ 为第i个节点的控制输入;  $W = (\omega_{ij})_{N \times N}$ 为网络的耦合构型矩阵,  $\omega_{ij} \geq 0$  ( $i \neq j$ )但并不全为零;  $\Gamma = \text{diag}\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 为内耦合矩阵;  $f, g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ 是满足  $f(0) = g(0) = 0$  的连续函数并且满足扇区有界条件:

$$[f(x) - f(y) - U_1(x-y)]^T [f(x) - f(y) - U_2(x-y)] < 0 \quad (2)$$

$U_1, U_2$ 为已知矩阵且  $U_1 - U_2 \geq 0$ 。

建立同步误差模型,  $s(k)$  是代表复杂网络节点动态特性的孤立节点:

$$s(k) = As(k) + f(s(k)) \quad (3)$$

其中,  $s(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_N(k)]^T$ 。

定义同步误差  $e_i(k) = x_i(k) - s(k)$ , 则离散复杂网络同步误差系统为:

$$e_i(k+1) = Ae_i(k) + f(e_i(k)) + \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \Gamma e_j(k) + u_i(k) \quad (4)$$

其中,  $f(e_i(k)) = f(x_i(k)) - f(s(k))$ ;

所述的S2中,对DoS攻击建模,选取能量有限的周期性DoS攻击信号:

$$\mathfrak{R}^{DoS}(k) = \begin{cases} 1, & k \in [h_n, h_n + b_n) \\ 0, & k \in [h_n + b_n, h_{n+1}) \end{cases} \quad (5)$$

其中,  $h_n$  表示系统第n次遭受干扰攻击结束且正常开始通信时刻;  $b_n$  是系统第n次开始通信时长,  $h_n + b_n$  表示系统正常通信结束同时又是第n+1次遭受攻击的开始时刻,  $h_{n+1}$  表示系统第n+1次遭受干扰攻击结束又正常开始通信时刻,集合  $\{h_n + b_n\} \cup [h_n + b_n, h_{n+1})$  表示系统通信时段正遭受第n+1次攻击干扰,即此段时间间隔内数据被破坏未正常发送。定义区间

$$I_{1,n} \triangleq [h_n, h_n + b_n), \quad I_{2,n} \triangleq [h_n + b_n, h_{n+1})。$$

所述的S3中,引入事件触发方案,选用静态事件触发机制,在DoS攻击存在的情况下,离散化系统的事件触发瞬间可以用如下时间区间表示,

$$k_{m,n}^i = \{k_{mg}^i \text{ 满足式(11)} | k_{mg}^i \in I_{1,n-1}\} \cup \{h_n\} \quad (6)$$

其中,  $k_{m,n}^i$  表示系统第  $i$  个节点在第  $n$  次 DoS 攻击下的第  $m$  次触发,  $m \in \{0, 1, \dots, l(n)\}$ ,  $l(n) = \sup \{l \in \mathbb{N} | k_{m,n}^i \leq h_n + b_n\}$ 。

根据等价时滞系统的采样误差传递函数, 定义如下分段函数:

$$\tau_{m,n}(k) = \begin{cases} k - k_{m,n}, & k \in [k_{m,n}, k_{m,n} + 1) \\ k - k_{m,n} - 1, & k \in [k_{m,n} + 1, k_{m,n} + 2) \\ \vdots \\ k - k_{m,n} - l, & k \in [k_{m,n} + l_{n-1}, k_{m+1,n}) \end{cases} \quad (7)$$

$$\hat{e}_{m,n}(k) = \begin{cases} 0, & k \in [k_{m,n}, k_{m,n} + 1) \\ e(k_{m,n}) - e(k_{m,n} + 1), & k \in [k_{m,n} + 1, k_{m,n} + 2) \\ \vdots \\ e(k_{m,n}) - e(k_{m,n} + l), & k \in [k_{m,n} + l_{n-1}, k_{m+1,n}) \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $0 \leq \tau_{m,n}(k) \leq \tau_M$ , 则  $e_i(k_{m,n}^i) = e_i(k - \tau_{m,n}(k)) + \hat{e}_{m,n}^i(k)$ ,  $k \in D_{m,n}$ 。故考虑 DoS 攻击时的事件触发条件表达式可以写成:

$$k_{m+1,n}^i = \min \left\{ k \in \mathbb{N} \mid k > k_{m,n}^i, [\hat{e}_i(k_{m,n}^i)]^\top \Omega_i [\hat{e}_i(k_{m,n}^i)] - \sigma_i e_i^\top(k_{m,n}^i + l) \Omega_i e_i(k_{m,n}^i + l) \leq 0 \right\} \quad (9)$$

其中,  $\sigma_i \in [0, 1)$ ,  $\Omega_i > 0$  为触发参数,  $\Omega = \text{diag}_N \{ \Omega_i \}$ ,  $k_{m,n}^i$  和  $k_{m,n}^i + l$  分别表示当前采样时间和控制信号更新的最后一个触发时刻。

考虑上述事件触发条件及 DoS 攻击影响, 设计控制器形式:

$$u_i(k) = \begin{cases} K_i e_i(k_{m,n}^i), & k \in D_{1,n} \cap I_{1,n} \\ 0, & k \in I_{2,n} \end{cases} \quad (10)$$

$K_i$  是待设计的控制器增益矩阵,  $D_{1,n} = [k_{m,n}, k_{m+1,n})$ 。

则同步误差系统表示为:

$$\begin{cases} e_i(k+1) = A e_i(k) + f(e_i(k)) + \sum \omega_j \Gamma e_j(k) + K_i (e_i(k - \tau_{m,n}(k))) + K_i \hat{e}_{m,n}^i(k), & k \in D_{1,n} \cap I_{1,n} \\ e_i(k+1) = A e_i(k) + f(e_i(k)) + \sum_{j=1}^N \omega_j \Gamma e_j(k), & k \in I_{2,n} \end{cases} \quad (11)$$

利用克罗内克积, 将同步误差系统表示成紧凑形式:

$$\begin{cases} e(k+1) = (\bar{A} + W \otimes \Gamma) e(k) + F(e(k)) + K e(k - \tau_{m,n}(k)) + K \hat{e}_{m,n}(k), & k \in D_{1,n} \cap I_{1,n} \\ e(k+1) = (\bar{A} + W \otimes \Gamma) e(k) + F(e(k)), & k \in I_{2,n} \end{cases} \quad (12)$$

其中,

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \text{diag}_N \{ A \} \\ e(k) &= [e_1^\top(k) \quad e_2^\top(k) \quad \dots \quad e_N^\top(k)]^\top \\ e(k - \tau_{m,n}(k)) &= [e_1^\top(k - \tau_{m,n}(k)) \quad e_2^\top(k - \tau_{m,n}(k)) \quad \dots \quad e_N^\top(k - \tau_{m,n}(k))]^\top \\ \hat{e}_{m,n}(k) &= [\hat{e}_{m,n}^{1\top}(k) \quad \hat{e}_{m,n}^{2\top}(k) \quad \dots \quad \hat{e}_{m,n}^{N\top}(k)]^\top \\ F(e(k)) &= [f^\top(e_1(k)) \quad f^\top(e_2(k)) \quad \dots \quad f^\top(e_N(k))]^\top \\ K &= \text{diag} \{ K_1 \quad K_2 \quad \dots \quad K_N \} \end{aligned} \quad (13)$$

所述的S4中,基于Lyapunov稳定性理论、有限时间同步方法,采用Schur补引理及不等式放缩技术等,得到使得同步误差模型有限时间有界的充分条件:

引理1, (Schur补引理) 对于给定的对称矩阵

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{bmatrix}$$

以下三个条件是等价的:

- 1)  $S < 0$ ;
- 2)  $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$ ;
- 3)  $S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0$ 。

引理2, 对于矩阵  $R > 0$ ,  $X$  和任意的实数  $\kappa$ ,  $-XR^{-1}X$  满足如下不等式  $-XR^{-1}X \leq \kappa^2 R - 2\kappa X$ 。

假设1, 定义系统时序  $k_2 > k_1 > 0$ ,  $N_{\sigma_1}$  表示未遭受攻击闭环子系统稳定状态下的切换次数;  $N_{\sigma_2}$  表示遭受攻击切换子系统不稳定开环状态下的切换次数, 且满足如下不等式关系:

$$N_{\sigma_1}(k_2, k_1) \leq \frac{T_1(k_2, k_1)}{T_{\text{off}}(k_2, k_1)}, \quad N_{\sigma_2}(k_2, k_1) \leq \frac{T_2(k_2, k_1)}{T_2(k_2, k_1) - T_{\text{off}}(k_2, k_1)}$$

$T_1(k_2, k_1)$  表示未遭受攻击下闭环子系统总体运行时间,  $T_2(k_2, k_1)$  表示遭受攻击下开环子系统总体运行时间,  $T_{\text{off}}(k_2, k_1)$  表示子系统正常通信时间

基于引理1、引理2以及Lyapunov稳定性理论、有限时间同步方法, 得到最终使得同步误差模型有限时间有界的线性矩阵不等式条件。

对于所有的  $i = 1, 2, \dots, N$ , 给定标量  $0 < \gamma_s < 1, \sigma_i, \kappa, \omega, 0 < m_1 < m_2, u_1, u_2 (s = 1, 2)$ , 若存在正定矩阵  $P_s, Q_s, R_s, X$ , 以及对应维数矩阵  $W > 0, E_s, F_s, M_s$ , 正标量  $o_1, o_2, a_1, a_2, a_3$ , 满足如下不等式, 则同步误差系统在有限时间内是有界的, 即离散复杂网络是有限时间同步的:

$$\begin{aligned} \Pi_{11} + \Pi_{12}^T P_1^{-1} \Pi_{12} + \Gamma_{11}^T + \Gamma_{11} + \tau_M \Gamma_{12}^T R_1^{-1} \Gamma_{12} + \tau_M M_1 &< 0 \\ \Pi_{21} + \Pi_{22}^T P_2^{-1} \Pi_{22} + \Gamma_2^T + \Gamma_2 + \tau_M M_2 &< 0 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} M_s & E_s \\ * & \gamma_s^{\tau_M} R_s \end{bmatrix} > 0, \quad s = 1, 2$$

$$\begin{bmatrix} M_s & F_s \\ * & \gamma_s^{\tau_M} R_s \end{bmatrix} > 0, \quad s = 1, 2$$

$$\begin{aligned} P_1 &\leq u_2 \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{\tau_M - 1} P_2 \\ P_2 &\leq u_1 P_1 \end{aligned} \quad (15)$$

$$Q_s \leq u_{3-s} Q_{3-s}$$

$$R_s \leq u_{3-s} R_{3-s}$$

$$\ln u_1 u_2 + (\tau_M - 1) \ln \frac{\gamma_1}{\gamma_2} + T \left[ \frac{\ln \gamma_1}{T_{\text{off}}} + \frac{\ln \gamma_2}{T - T_{\text{off}}} \right] < 0$$

其中,

$$\begin{aligned}
\Pi_{11} &= \begin{bmatrix} -\gamma_1 P_1 + Q_1 - 2\tilde{U}_1 & -\tilde{U}_2 & 0 & 0 & 0 \\ * & -2I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma_1^{\tau_M} Q_1 & 0 & 0 \\ * & * & * & \omega\Omega & 0 \\ * & * & * & * & -\Omega \end{bmatrix} \\
\Pi_{21} &= \begin{bmatrix} -\gamma_2 P_2 + Q_2 - 2\tilde{U}_1 & -\tilde{U}_2 & 0 & 0 \\ * & -2I & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma_2^{\tau_M} Q_2 & 0 \\ * & * & * & 0 \end{bmatrix} \\
\Pi_{12} &= [P_1(W \otimes \Gamma + \bar{A}) \quad P_1 \quad 0 \quad X \quad X]^T \\
\Pi_{22} &= [P_2(W \otimes \Gamma + \bar{A}) \quad P_2 \quad 0 \quad 0]^T \\
\Gamma_{11} &= [E_1 \quad 0 \quad -F_1 \quad -E_1 + F_1 \quad 0] \\
\Gamma_{12} &= [\sqrt{\tau_M} P_1(W \otimes \Gamma + \bar{A} - I) \quad \sqrt{\tau_M} P_1 \quad 0 \quad \sqrt{\tau_M} X \quad \sqrt{\tau_M} X]^T \\
\Gamma_{21} &= [E_2 \quad 0 \quad -F_2 \quad -E_2 + F_2] \\
\Gamma_{22} &= [\sqrt{\tau_M} R_2(W \otimes \Gamma + \bar{A} - I) \quad \sqrt{\tau_M} R_2 \quad 0 \quad 0]^T \\
\tilde{U}_1 &= \frac{\hat{U}_1^T \hat{U}_2 + \hat{U}_2^T \hat{U}_1}{2}, \quad \tilde{U}_2 = -\frac{\hat{U}_1^T + \hat{U}_2^T}{2}, \quad \hat{U}_1 = \text{diag}_N \{U_1\}, \quad \hat{U}_2 = \text{diag}_N \{U_2\} \\
o_1 &= \sum_{i=-\tau_M}^{-1} \gamma^{-i-1} = \frac{\gamma^{\tau_M-1}(1-\gamma^{\tau_M})}{1-\gamma}, \quad o_2 = \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \sum_{i=j+1}^{-1} \gamma^{-i-1} = \frac{1-\gamma^{\tau_M-1}-\gamma^{\tau_M}+\gamma^{2\tau_M-2}}{1-\gamma^2} \\
\text{控制器增益 } K &= X P^{-1}, \text{ 息停时间为 } T = \begin{cases} \log_{\gamma} \frac{m_2 \lambda_{\min}(P)}{m_1 L_1 + \omega L_2}, & m_2 < \frac{m_1 L_1 + \omega L_2}{\lambda_{\min}(P)} \\ 0, & m_2 \geq \frac{m_1 L_1 + \omega L_2}{\lambda_{\min}(P)} \end{cases} \circ
\end{aligned} \tag{16}$$

## 一种受DoS攻击的离散复杂网络事件触发有限时间同步控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于网络控制技术领域,具体设计一种受DoS攻击的离散复杂网络事件触发有限时间同步控制方法。

### 背景技术

[0002] 复杂网络在现实世界中普遍存在,如电力网络、社交网络等。复杂网络由大量耦合节点组成,具有节点规模大、连接多样性强、网络拓扑结构复杂等特点,这些固有特征给复杂网络的分析和综合设计带来了巨大的挑战,也大大增加了其受到网络攻击的可能性,DoS攻击因其具有方式简单、易达目的、难以防范和追查等特性,已经成为一种常见的攻击方式。

[0003] 相较于连续复杂网络,离散时间复杂网络在现实世界中具有更广泛的存在,而现有研究成果大多集中在连续复杂网络,离散时间复杂网络还没有得到充分的研究,依然存在很大的空缺。

[0004] 此外,复杂网络的同步性作为一种常见而重要的现象,具有重要的研究意义。现有研究大多集中在系统在无穷区间的性能上,而忽视其可能具有很坏的暂态性能,例如中国专利申请CN112995154B《一种受非周期性DoS攻击的复杂网络同步控制方法》,研究了复杂系统在无穷区间上的指数同步问题,而未关注到系统在某一时间段内的性能如何。

[0005] 因此本发明提供了一种处理离散复杂网络在有限时间内的同步问题的方法,并且可以应对网络中的拒绝服务(DoS)攻击带来的影响,同时引入事件触发策略,有效节约了网络资源。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的是,提供一种受拒绝服务(DoS)攻击的离散复杂网络事件触发有限时间同步控制方法,来解决离散复杂网络在遭受拒绝服务(DoS)攻击的情况下,基于事件触发机制,使同步误差模型达到有限时间有界的问题。实现了离散复杂系统和孤立节点之间的有限时间同步,有效节约了网络资源。

[0007] 技术方案:

[0008] 一种受DoS攻击的离散复杂网络事件触发有限时间同步控制方法,包括以下步骤:

[0009] S1:建立有N个节点的离散复杂网络的同步误差模型;

[0010] S2:考虑周期DoS攻击对系统的影响,对周期DoS攻击建模;

[0011] S3:设计事件触发条件,并引入到同步误差模型中,建立周期DoS攻击下基于事件触发的N个节点离散复杂网络的同步误差模型;

[0012] S4:选取Lyapunov函数,基于Lyapunov稳定性理论、有限时间同步方法,采用Schur补引理及不等式放缩技术等,得到使得同步误差模型有限时间有界的充分条件;

[0013] S5:对线性矩阵不等式求解,得到满足离散复杂网络有限时间同步的控制器增益

矩阵和事件触发参数;

[0014] 所述的S1中,建立有N个节点的离散复杂网络的系统模型:

$$[0015] \quad x_i(k+1) = Ax_i(k) + f(x_i(k)) + \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \Gamma x_j(k) + u_i(k) \quad i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

[0016] 其中,A为已知适当维数的矩阵, $i=1,2,\dots,N$ ;  $x_i(t) \in \mathbb{R}^n$ 为系统状态向量;  $u_i(k) \in \mathbb{R}^n$ 为第i个节点的控制输入;  $W = (\omega_{ij})_{N \times N}$ 为网络的耦合构型矩阵,  $\omega_{ij} \geq 0 (i \neq j)$ 但并不全为零;  $\Gamma = \text{diag}\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ 为内耦合矩阵;  $f, g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ 是满足  $f(0) = g(0) = 0$  的连续函数并且满足扇区有界条件:

$$[0017] \quad [f(x) - f(y) - U_1(x-y)]^T [f(x) - f(y) - U_2(x-y)] < 0 \quad (2)$$

[0018]  $U_1, U_2$ 为已知矩阵且  $U_1 - U_2 \geq 0$ 。

[0019] 建立同步误差模型,  $s(k)$  是代表复杂网络节点动态特性的孤立节点:

$$[0020] \quad s(k) = As(k) + f(s(k)) \quad (3)$$

[0021] 其中,  $s(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_N(k)]^T$ 。

[0022] 定义同步误差  $e_i(k) = x_i(k) - s(k)$ , 则离散复杂网络同步误差系统为:

$$[0023] \quad e_i(k+1) = Ae_i(k) + f(e_i(k)) + \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \Gamma e_j(k) + u_i(k) \quad (4)$$

[0024] 其中,  $f(e_i(k)) = f(x_i(k)) - f(s(k))$ ;

[0025] 所述的S2中,对DoS攻击建模,选取能量有限的周期性DoS攻击信号:

$$[0026] \quad \mathfrak{R}^{DoS}(k) = \begin{cases} 1, & k \in [h_n, h_n + b_n) \\ 0, & k \in [h_n + b_n, h_{n+1}) \end{cases} \quad (5)$$

[0027] 其中,  $h_n$ 表示系统第n次遭受干扰攻击结束且正常开始通信时刻;  $b_n$ 是系统第n次开始通信时长,  $h_n + b_n$ 表示系统正常通信结束同时又是第n+1次遭受攻击的开始时刻,  $h_{n+1}$ 表示系统第n+1次遭受干扰攻击结束又正常开始通信时刻,集合  $\{h_n + b_n\} \cup [h_n + b_n, h_{n+1})$ 表示系统通信时段正遭受第n+1次攻击干扰,即此段时间间隔内数据被破坏未正常发送。定义区间  $I_{1,n} \triangleq [h_n, h_n + b_n)$ ,  $I_{2,n} \triangleq [h_n + b_n, h_{n+1})$ 。

[0028] 所述的S3中,引入事件触发方案,选用静态事件触发机制,在DoS攻击存在的情况下,离散化系统的事件触发瞬间可以用如下时间区间表示,

$$[0029] \quad k_{m,n}^i = \{k_{mg}^i \text{ 满足式(11)} \mid k_{mg}^i \in I_{1,n-1}\} \cup \{h_n\} \quad (6)$$

[0030] 其中,  $k_{m,n}^i$ 表示系统第i个节点在第n次DoS攻击下的第m次触发,  $m \in \{0, 1, \dots, l(n)\}$ ,  $l(n) = \sup \{l \in N \mid k_{m,n}^i \leq h_n + b_n\}$ 。

[0031] 根据等价时滞系统的采样误差传递函数,定义如下分段函数:

$$[0032] \quad \tau_{m,n}(k) = \begin{cases} k - k_{m,n}, & k \in [k_{m,n}, k_{m,n} + 1) \\ k - k_{m,n} - 1, & k \in [k_{m,n} + 1, k_{m,n} + 2) \\ \vdots \\ k - k_{m,n} - l, & k \in [k_{m,n} + l_{n-1}, k_{m+1,n}) \end{cases} \quad (7)$$

$$[0033] \quad \hat{e}_{m,n}(k) = \begin{cases} 0, & k \in [k_{m,n}, k_{m,n} + 1) \\ e(k_{m,n}) - e(k_{m,n} + 1), & k \in [k_{m,n} + 1, k_{m,n} + 2) \\ \vdots \\ e(k_{m,n}) - e(k_{m,n} + l), & k \in [k_{m,n} + l_{n-1}, k_{m,n} + l) \end{cases} \quad (8)$$

[0034] 其中,  $0 \leq \tau_{m,n}(k) \leq \tau_M$ , 则  $e_i(k_{m,n}^i) = e_i(k - \tau_{m,n}(k)) + \hat{e}_{m,n}^i(k)$ ,  $k \in D_{m,n}$ 。故考虑DoS攻击时的事件触发条件表达式可以写成:

$$[0035] \quad k_{m+1,n}^i = \min \left\{ k \in \mathbb{N} \mid k > k_{m,n}^i, [\hat{e}_i(k_{m,n}^i)]^\top \Omega_i [\hat{e}_i(k_{m,n}^i)] - \sigma_i e_i^\top(k_{m,n}^i + l) \Omega_i e_i(k_{m,n}^i + l) \leq 0 \right\} \quad (9)$$

[0036] 其中,  $\sigma_i \in [0, 1)$ ,  $\Omega_i > 0$  为触发参数,  $\Omega = \text{diag}_N \{ \Omega_i \}$ ,  $k_{m,n}^i$  和  $k_{m,n}^i + l$  分别表示当前采样时间和控制信号更新的最后一个触发时刻。

[0037] 考虑上述事件触发条件及DoS攻击影响, 设计控制器形式:

$$[0038] \quad u_i(k) = \begin{cases} K_i e_i(k_{m,n}^i), & k \in D_{1,n} \cap I_{1,n} \\ 0, & k \in I_{2,n} \end{cases} \quad (10)$$

[0039]  $K_i$  是待设计的控制器增益矩阵,  $D_{1,n} = [k_{m,n}, k_{m+1,n})$ 。

[0040] 则同步误差系统表示为:

$$[0041] \quad \begin{cases} e_i(k+1) = A e_i(k) + f(e_i(k)) + \sum \omega_j \Gamma e_j(k) + K_i (e_i(k - \tau_{m,n}(k))) + K_i \hat{e}_{m,n}^i(k), & k \in D_{1,n} \cap I_{1,n} \\ e_i(k+1) = A e_i(k) + f(e_i(k)) + \sum_{j=1}^N \omega_j \Gamma e_j(k), & k \in I_{2,n} \end{cases} \quad (11)$$

[0042] 利用克罗内克积, 将同步误差系统表示成紧凑形式:

$$[0043] \quad \begin{cases} e(k+1) = (\bar{A} + W \otimes \Gamma) e(k) + F(e(k)) + K e(k - \tau_{m,n}(k)) + K \hat{e}_{m,n}(k), & k \in D_{1,n} \cap I_{1,n} \\ e(k+1) = (\bar{A} + W \otimes \Gamma) e(k) + F(e(k)), & k \in I_{2,n} \end{cases} \quad (12)$$

[0044] 其中,

$$[0045] \quad \begin{aligned} \bar{A} &= \text{diag}_N \{ A \} \\ e(k) &= [e_1^\top(k) \quad e_2^\top(k) \quad \cdots \quad e_N^\top(k)]^\top \\ e(k - \tau_{m,n}(k)) &= [e_1^\top(k - \tau_{m,n}(k)) \quad e_2^\top(k - \tau_{m,n}(k)) \quad \cdots \quad e_N^\top(k - \tau_{m,n}(k))]^\top \\ \hat{e}_{m,n}(k) &= [\hat{e}_{m,n}^{1^\top}(k) \quad \hat{e}_{m,n}^{2^\top}(k) \quad \cdots \quad \hat{e}_{m,n}^{N^\top}(k)]^\top \\ F(e(k)) &= [f^\top(e_1(k)) \quad f^\top(e_2(k)) \quad \cdots \quad f^\top(e_N(k))]^\top \\ K &= \text{diag} \{ K_1 \quad K_2 \quad \cdots \quad K_N \} \end{aligned} \quad (13)$$

[0046] 所述的S4中, 基于Lyapunov稳定性理论、有限时间同步方法, 采用Schur补引理及不等式放缩技术等, 得到使得同步误差模型有限时间有界的充分条件:

[0047] 引理1, (Schur补引理) 对于给定的对称矩阵

$$[0048] \quad S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^\top & S_{22} \end{bmatrix}$$

[0049] 以下三个条件是等价的:

[0050] 1)  $S < 0$ ;



[0051] 2)  $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0;$

[0052] 3)  $S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0。$

[0053] 引理2,对于矩阵 $R > 0, X$ 和任意的实数 $\kappa, -XR^{-1}X$ 满足如下不等式

[0054]  $-XR^{-1}X \leq \kappa^2 R - 2\kappa X。$

[0055] 假设1,定义系统时序 $k_2 > k_1 > 0, N_{\sigma_1}$ 表示未遭受攻击闭环子系统稳定状态下的切换次数; $N_{\sigma_2}$ 表示遭受攻击切换子系统不稳定开环状态下的切换次数,且满足如下不等式关系:

[0056] 
$$N_{\sigma_1}(k_2, k_1) \leq \frac{T_1(k_2, k_1)}{T_{off}(k_2, k_1)}, N_{\sigma_2}(k_2, k_1) \leq \frac{T_2(k_2, k_1)}{T_2(k_2, k_1) - T_{off}(k_2, k_1)}$$

[0057]  $T_1(k_2, k_1)$ 表示未遭受攻击下闭环子系统总体运行时间, $T_2(k_2, k_1)$ 表示遭受攻击下开环子系统总体运行时间, $T_{off}(k_2, k_1)$ 表示子系统正常通信时间

[0058] 基于引理1、引理2以及Lyapunov稳定性理论、有限时间同步方法,得到最终使得同步误差模型有限时间有界的线性矩阵不等式条件。

[0059] 对于所有的 $i = 1, 2, \dots, N$ ,给定标量 $0 < \gamma_s < 1, \sigma_i, \kappa, \omega, 0 < m_1 < m_2, u_1, u_2 (s = 1, 2)$ ,若存在正定矩阵 $P_s, Q_s, R_s, X$ ,以及对应维数矩阵 $W > 0, E_s, F_s, M_s$ ,正标量 $o_1, o_2, a_1, a_2, a_3$ ,满足如下不等式,则同步误差系统在有限时间内是有界的,即离散复杂网络是有限时间同步的:

$$\begin{aligned} & \Pi_{11} + \Pi_{12}^T P_1^{-1} \Pi_{12} + \Gamma_{11}^T + \Gamma_{11} + \tau_M \Gamma_{12}^T R_1^{-1} \Gamma_{12} + \tau_M M_1 < 0 \\ & \Pi_{21} + \Pi_{22}^T P_2^{-1} \Pi_{22} + \Gamma_{21}^T + \Gamma_{21} + \tau_M M_2 < 0 \\ [0060] & \begin{bmatrix} M_s & E_s \\ * & \gamma_s^{\tau_M} R_s \end{bmatrix} > 0, \quad s = 1, 2 \\ & \begin{bmatrix} M_s & F_s \\ * & \gamma_s^{\tau_M} R_s \end{bmatrix} > 0, \quad s = 1, 2 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & P_1 \leq u_2 \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{\tau_M - 1} P_2 \\ [0061] & P_2 \leq u_1 P_1 \\ & Q_s \leq u_{3-s} Q_{3-s} \\ & R_s \leq u_{3-s} R_{3-s} \end{aligned} \quad (15)$$

[0062]  $\ln u_1 u_2 + (\tau_M - 1) \ln \frac{\gamma_1}{\gamma_2} + T \left[ \frac{\ln \gamma_1}{T_{off}} + \frac{\ln \gamma_2}{T - T_{off}} \right] < 0$

[0063] 其中,

[0064] 
$$\Pi_{11} = \begin{bmatrix} -\gamma_1 P_1 + Q_1 - 2\tilde{U}_1 & -\tilde{U}_2 & 0 & 0 & 0 \\ * & -2I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma_1^{\tau_M} Q_1 & 0 & 0 \\ * & * & * & \sigma \Omega & 0 \\ * & * & * & * & -\Omega \end{bmatrix}$$

$$[0065] \quad \Pi_{21} = \begin{bmatrix} -\gamma_2 P_2 + Q_2 - 2\tilde{U}_1 & -\tilde{U}_2 & 0 & 0 \\ * & -2I & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma_2^{\tau_M} Q_2 & 0 \\ * & * & * & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0066] \quad \Pi_{12} = [P_1(W \otimes \Gamma + \bar{A}) \quad P_1 \quad 0 \quad X \quad X]^T$$

$$[0067] \quad \Pi_{22} = [P_2(W \otimes \Gamma + \bar{A}) \quad P_2 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$[0068] \quad \Gamma_{11} = [E_1 \quad 0 - F_1 - E_1 + F_1 \quad 0]$$

$$[0069] \quad \Gamma_{12} = [\sqrt{\tau_M} P_1(W \otimes \Gamma + \bar{A} - I) \quad \sqrt{\tau_M} P_1 \quad 0 \quad \sqrt{\tau_M} X \quad \sqrt{\tau_M} X]^T$$

$$[0070] \quad \Gamma_{21} = [E_2 \quad 0 - F_2 - E_2 + F_2]$$

$$[0071] \quad \Gamma_{22} = [\sqrt{\tau_M} R_2(W \otimes \Gamma + \bar{A} - I) \quad \sqrt{\tau_M} R_2 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$[0072] \quad \tilde{U}_1 = \frac{\hat{U}_1^T \hat{U}_2 + \hat{U}_2^T \hat{U}_1}{2}, \quad \tilde{U}_2 = -\frac{\hat{U}_1^T + \hat{U}_2^T}{2}, \quad \hat{U}_1 = \text{diag}_N\{U_1\}, \quad \hat{U}_2 = \text{diag}_N\{U_2\}$$

$$[0073] \quad o_1 = \sum_{i=-\tau_M}^{-1} \gamma^{-i-1} = \frac{\gamma^{\tau_M-1}(1-\gamma^{\tau_M})}{1-\gamma}, \quad o_2 = \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \sum_{i=j+1}^{-1} \gamma^{-i-1} = \frac{1-\gamma^{\tau_M-1}-\gamma^{\tau_M}+\gamma^{2\tau_M-2}}{1-\gamma^2} \quad (16)$$

$$[0074] \quad \text{控制器增益 } K = X P^{-1}, \text{ 息停时间为 } T = \begin{cases} \log_{\gamma} \frac{m_2 \lambda_{\min}(P)}{m_1 L_1 + \omega L_2}, & m_2 < \frac{m_1 L_1 + \omega L_2}{\lambda_{\min}(P)} \\ 0, & m_2 \geq \frac{m_1 L_1 + \omega L_2}{\lambda_{\min}(P)} \end{cases}.$$

[0075] 本发明有如下有益效果:

[0076] (1) 本发明选用离散时间复杂网络模型, 相较于常见的连续时间, 更加贴合实际工程, 具有更广泛的应用面; 同时考虑了拒绝服务 (DoS) 攻击的影响, 选用事件触发控制策略, 建立了新的同步误差模型, 节省了网络资源, 提高了信息传输效率。

[0077] (2) 本发明考虑的同步为有限时间同步, 更加关心同步误差系统在有限时间内的暂态性能, 相较于一般所说的无穷区间上的稳定意义, 更加适应实际工程需求, 具有广泛的实际应用意义。

## 附图说明

[0078] 图1是本发明所述方法的流程图;

[0079] 图2是仿真案例中复杂网络的开环系统响应曲线图;

[0080] 图3是仿真案例中闭环误差系统的响应曲线图;

[0081] 图4是仿真案例中拒绝服务 (DoS) 攻击干扰和闭环误差系统的响应曲线的联合绘制图;

[0082] 图5是仿真案例中事件触发的时刻序列图。

## 具体实施方案

[0083] 以下案例仅作为演示, 旨在更清晰的表述本发明的技术方案, 不能以此来限制本

发明的适用范围。除另有说明,本发明使用的专业术语或者学术表达应为本发明所属领域的通常意义。

[0084] 图1是一种受DoS攻击的离散复杂网络事件触发有限时间同步控制方法的结构示意图,主要包括以下步骤:

[0085] S1:建立有N个节点的离散复杂网络的同步误差模型;

[0086] S2:考虑周期DoS攻击对系统的影响,对周期DoS攻击建模;

[0087] S3:设计事件触发条件,并引入到同步误差模型中,建立周期DoS攻击下基于事件触发的N个节点离散复杂网络的同步误差模型;

[0088] S4:选取Lyapunov函数,基于Lyapunov稳定性理论、有限时间同步方法,采用Schur补引理及不等式放缩技术等,得到使得同步误差模型有限时间有界的充分条件;

[0089] S5:对线性矩阵不等式求解,得到满足离散复杂网络有限时间同步的控制器增益矩阵和事件触发参数;

[0090] 所述S1中,建立有N个节点的离散复杂网络的同步误差模型:

$$[0091] \quad x_i(k+1) = Ax_i(k) + f(x_i(k)) + \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \Gamma x_j(k) + u_i(k) \quad i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

[0092] 其中,A为已知适当维数的矩阵, $i=1,2,\dots,N$ ;  $x_i(t) \in \mathbb{R}^n$  为系统状态向量;  $u_i(k) \in \mathbb{R}^n$  为第i个节点的控制输入;  $W = (\omega_{ij})_{N \times N}$  为网络的耦合构型矩阵,  $\omega_{ij} \geq 0 (i \neq j)$  但并不全为零;  $\Gamma = \text{diag}\{r_1, r_2, \dots, r_n\}$  为内耦合矩阵;  $f, g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  是满足  $f(0) = g(0) = 0$  的连续函数并且满足扇区有界条件:

$$[0093] \quad [f(x) - f(y) - U_1(x-y)]^T [f(x) - f(y) - U_2(x-y)] < 0 \quad (2)$$

[0094]  $U_1, U_2$  为已知矩阵且  $U_1 - U_2 \geq 0$ 。

[0095] 建立同步误差模型,  $s(k)$  是代表复杂网络节点动态特性的孤立节点:

$$[0096] \quad s(k) = As(k) + f(s(k)) \quad (3)$$

[0097] 其中,  $s(k) = [s_1(k), s_2(k), \dots, s_N(k)]^T$ 。

[0098] 定义同步误差  $e_i(k) = x_i(k) - s(k)$ , 则离散复杂网络同步误差系统为:

$$[0099] \quad e_i(k+1) = Ae_i(k) + f(e_i(k)) + \sum_{j=1}^N \omega_{ij} \Gamma e_j(k) + u_i(k) \quad (4)$$

[0100] 其中,  $f(e_i(k)) = f(x_i(k)) - f(s(k))$ ;

[0101] 所述的S2中,对DoS攻击建模,选取能量有限的周期性DoS攻击信号:

$$[0102] \quad \mathfrak{R}^{DoS}(k) = \begin{cases} 1, & k \in [h_n, h_n + b_n) \\ 0, & k \in [h_n + b_n, h_{n+1}) \end{cases} \quad (5)$$

[0103] 其中,  $h_n$  表示系统第n次遭受干扰攻击结束且正常开始通信时刻;  $b_n$  是系统第n次开始通信时长,  $h_n + b_n$  表示系统正常通信结束同时又是第n+1次遭受攻击的开始时刻,  $h_{n+1}$  表示系统第n+1次遭受干扰攻击结束又正常开始通信时刻,集合  $\{h_n + b_n\} \cup [h_n + b_n, h_{n+1})$  表示系统通信时段正遭受第n+1次攻击干扰,即此段时间间隔内数据被破坏未正常发送。定义区间  $I_{1,n} \triangleq [h_n, h_n + b_n)$ ,  $I_{2,n} \triangleq [h_n + b_n, h_{n+1})$ 。

[0104] 所述的S3中,引入事件触发方案,选用静态事件触发机制,在DoS攻击存在的情况下,离散化系统的事件触发瞬间可以用如下时间区间表示,

$$[0105] \quad k_{m,n}^i = \{k_{mg}^i \text{ 满足式 (9)} \mid k_{mg}^i \in I_{1,n-1}\} \cup \{h_n\} \quad (6)$$

[0106] 其中,  $k_{m,n}^i$  表示系统第  $i$  个节点在第  $n$  次 DoS 攻击下的第  $m$  次触发,  $m \in \{0, 1, \dots, l(n)\}$ ,  $l(n) = \sup \{l \in \mathbb{N} \mid k_{m,n}^i \leq h_n + b_n\}$ 。

[0107] 根据等价时滞系统的采样误差传递函数, 定义如下分段函数:

$$[0108] \quad \tau_{m,n}(k) = \begin{cases} k - k_{m,n}, & k \in [k_{m,n}, k_{m,n} + 1) \\ k - k_{m,n} - 1, & k \in [k_{m,n} + 1, k_{m,n} + 2) \\ \vdots \\ k - k_{m,n} - l, & k \in [k_{m,n} + l_{n-1}, k_{m+1,n}) \end{cases} \quad (7)$$

$$[0109] \quad \hat{e}_{m,n}(k) = \begin{cases} 0, & k \in [k_{m,n}, k_{m,n} + 1) \\ e(k_{m,n}) - e(k_{m,n} + 1), & k \in [k_{m,n} + 1, k_{m,n} + 2) \\ \vdots \\ e(k_{m,n}) - e(k_{m,n} + l), & k \in [k_{m,n} + l_{n-1}, k_{m+1,n}) \end{cases} \quad (8)$$

[0110] 其中,  $0 \leq \tau_{m,n}(k) \leq \tau_M$ , 则  $e_i(k_{m,n}) = e_i(k - \tau_{m,n}(k)) + \hat{e}_{m,n}(k)$ ,  $k \in D_{m,n}$ ,  $k_{m,n}$  和  $k_{m,n} + 1$  分别表示当前采样时间和控制信号更新的最后一个触发时刻。故考虑 DoS 攻击时的事件触发条件表达式可以写成:

$$[0111] \quad k_{m+1,n}^i = \min \left\{ k \in \mathbb{N} \mid k > k_{m,n}^i, [\hat{e}_{m,n}^i(k)]^T \Omega_i [e_{m,n}^i(k)] - \sigma_i e_i^T(k - \tau_{m,n}^i(k)) \Omega_i e_i(k - \tau_{m,n}^i(k)) \leq 0 \right\} \quad (9)$$

[0112] 其中,  $\sigma_i \in [0, 1)$ ,  $\Omega_i > 0$  为触发参数,  $\Omega = \text{diag}_N \{\Omega_i\}$ 。

[0113] 考虑上述事件触发条件及 DoS 攻击影响, 设计控制器形式:

$$[0114] \quad u_i(k) = \begin{cases} K_i e_i(k_{m,n}^i), & k \in D_{1,n} \cap I_{1,n} \\ 0, & k \in I_{2,n} \end{cases} \quad (10)$$

[0115]  $K_i$  是待设计的控制器增益矩阵,  $D_{1,n} = [k_{m,n}, k_{m,n})$ 。

[0116] 则同步误差系统表示为:

$$[0117] \quad \begin{cases} e_i(k+1) = A e_i(k) + f(e_i(k)) + \sum \omega_j \Gamma e_j(k) + K_i (e_i(k - \tau_{m,n}(k))) + K_i \hat{e}_{m,n}^i(k), & k \in D_{1,n} \cap I_{1,n} \\ e_i(k+1) = A e_i(k) + f(e_i(k)) + \sum_{j=1}^N \omega_j \Gamma e_j(k), & k \in I_{2,n} \end{cases} \quad (11)$$

[0118] 利用克罗内克积, 将同步误差系统表示成紧凑形式:

$$[0119] \quad \begin{cases} e(k+1) = (\bar{A} + W \otimes \Gamma) e(k) + F(e(k)) + K e(k - \tau_{m,n}(k)) + K \hat{e}_{m,n}(k), & k \in D_{1,n} \cap I_{1,n} \\ e(k+1) = (\bar{A} + W \otimes \Gamma) e(k) + F(e(k)), & k \in I_{2,n} \end{cases} \quad (12)$$

[0120] 其中,

$$[0121] \quad \bar{A} = \text{diag}_N \{A\}$$

$$[0122] \quad e(k) = [e_1^T(k) \quad e_2^T(k) \quad \dots \quad e_N^T(k)]^T$$

$$[0123] \quad e(k - \tau_{m,n}(k)) = [e_1^T(k - \tau_{m,n}(k)) \quad e_2^T(k - \tau_{m,n}(k)) \quad \dots \quad e_N^T(k - \tau_{m,n}(k))]^T$$

$$[0124] \quad F(e(k)) = [f^T(e_1(k)) \quad f^T(e_2(k)) \quad \dots \quad f^T(e_N(k))]^T$$

[0125]  $K = \text{diag}\{K_1, K_2, \dots, K_N\}$

[0126] 所述的S4中,基于Lyapunov稳定性理论、有限时间同步方法,采用Schur补引理及不等式放缩技术等,得到使得同步误差模型有限时间有界的充分条件:

[0127] 引理1, (Schur补引理)对于给定的对称矩阵

$$[0128] \quad S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{bmatrix}$$

[0129] 以下三个条件是等价的:

[0130] 1)  $S < 0$ ;

[0131] 2)  $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^T S_{11}^{-1} S_{12} < 0$ ;

[0132] 3)  $S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^T < 0$ 。

[0133] 引理2,对于矩阵 $R > 0, X$ ,和任意的实数 $\kappa, -XR^{-1}X$ 满足如下不等式

[0134]  $-XR^{-1}X \leq \kappa^2 R - 2\kappa X$ 。

[0135] 假设1,定义系统时序 $k_2 > k_1 > 0, N_{\sigma_1}$ 表示未遭受攻击闭环子系统稳定状态下的切换次数; $N_{\sigma_2}$ 表示遭受攻击切换子系统不稳定开环状态下的切换次数,且满足如下不等式关系:

$$[0136] \quad N_{\sigma_1}(k_2, k_1) \leq \frac{T_1(k_2, k_1)}{T_{\text{off}}(k_2, k_1)}, \quad N_{\sigma_2}(k_2, k_1) \leq \frac{T_2(k_2, k_1)}{T_2(k_2, k_1) - T_{\text{off}}(k_2, k_1)}$$

[0137]  $T_1(k_2, k_1)$ 表示未遭受攻击下闭环子系统总体运行时间, $T_2(k_2, k_1)$ 表示遭受攻击下开环子系统总体运行时间, $T_{\text{off}}(k_2, k_1)$ 表示子系统正常通信时间。

[0138] 构造Lyapunov函数:

$$[0139] \quad V(k) = \sum_{i=1}^3 V_i^s(k), \quad s = 1, 2 \quad (13)$$

[0140] 其中, $V_1^s(k) = e^T(k) P_s e(k), V_2^s(k) = \sum_{i=k-\tau_M}^{k-1} \gamma_s^{k-i-1} e^T(i) Q_s e(i), V_3^s(k) = \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \sum_{i=j+k}^{k-1} \gamma_s^{k-i-1} \delta(i) R_s \delta^T(i),$

$\delta(k) = e(k+1) - e(k)$ 。

[0141] 沿着闭环系统求 $V(k)$ 的差分:

[0142]  $\Delta V_1^s(k) = V_1^s(k+1) - \gamma_s V_1^s(k)$

[0143]  $= e^T(k+1) P_s e(k+1) - \gamma_s e^T(k) P_s e(k)$

$\Delta V_2^s(k) = V_2^s(k+1) - \gamma_s V_2^s(k)$

$$[0144] \quad = \sum_{i=k-\tau_M+1}^k \gamma_s^{k-i} e^T(i) Q_s e(i) - \sum_{i=k-\tau_M}^{k-1} \gamma_s^{k-i} e^T(i) Q_s e(i) \\ = e^T(k) Q_s e(k) - \gamma_s^{\tau_M} e^T(k - \tau_M) Q_s e(k - \tau_M)$$

$$\begin{aligned}
\Delta V_3^s(k) &= V_3^s(k+1) - \gamma_s V_3^s(k) \\
&= \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \sum_{i=k+j+1}^k \gamma_s^{k-i} \delta^T(i) R_s \delta(i) - \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \sum_{i=k+j}^{k-1} \gamma_s^{k-i} \delta^T(i) R_s \delta(i) \\
&= \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \left( \sum_{i=k+j+1}^k - \sum_{i=k+j}^{k-1} \right) \gamma_s^{k-i} \delta^T(i) R_s \delta(i) \\
[0145] \quad &= \sum_{j=-\tau_M}^{-1} (\delta^T(k) R_s \delta(k) - \gamma_s^{-j} \delta^T(k+j) R_s \delta(k+j)) \\
&= \tau_M \delta^T(k) R_s \delta(k) - \sum_{i=k-\tau_M}^{k-1} \gamma_s^{k-i} \delta^T(i) R_s \delta(i) \\
&\leq \tau_M \delta^T(k) R_s \delta(k) - \sum_{i=k-\tau_M}^{k-1} \gamma_s^{\tau_M} \delta^T(i) R_s \delta(i)
\end{aligned} \tag{14}$$

[0146] 当  $k \in D_{1,n} \cap I_{1,n}$  时,  $s=1$ 。

$$\begin{aligned}
\Delta V^1(k) &= \Delta V_1^1(k) + \Delta V_2^1(k) + \Delta V_3^1(k) \\
[0147] \quad &= e^T(k+1) P_1 e(k+1) - \gamma_1 e^T(k) P_1 e(k) + e^T(k) Q_1 e(k) - \gamma_1^{\tau_M} e^T(k - \tau_M) Q_1 e(k - \tau_M) \\
&\quad + \tau_M \delta^T(k) R_1 \delta(k) - \sum_{i=k-\tau_M}^{k-1} \gamma_1^{\tau_M} \delta^T(i) R_1 \delta(i)
\end{aligned} \tag{15}$$

[0148] 考虑事件触发条件和扇区有界条件, 可得:

$$\begin{aligned}
\Delta V^1(k) &= \Delta V_1^1(k) + \Delta V_2^1(k) + \Delta V_3^1(k) \\
&\leq e^T(k+1) P_1 e(k+1) - \gamma_1 e^T(k) P_1 e(k) + e^T(k) Q_1 e(k) - \gamma_1^{\tau_M} e^T(k - \tau_M) Q_1 e(k - \tau_M) \\
&\quad + \tau_M \delta^T(k) R_1 \delta(k) - \sum_{i=k-\tau_M}^{k-1} \gamma_1^{\tau_M} \delta^T(i) R_1 \delta(i) - [\hat{e}_{m,n}(k)]^T \Omega [\hat{e}_{m,n}(k)] \\
[0149] \quad &\quad + \sigma e^T(k - \tau_{m,n}(k)) \Omega e(k - \tau_{m,n}(k)) - 2 \begin{bmatrix} e(k) \\ F(e(k)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tilde{U}_1 & \tilde{U}_2 \\ * & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(k) \\ F(e(k)) \end{bmatrix} \\
&\quad + \tau_M \zeta_1^T(k) M_1 \zeta_1(k) - \sum_{i=k-\tau_M}^{k-1} \zeta_1^T(k) M_1 \zeta_1(k) \\
&\quad + 2 \zeta_1^T(k) E_1 [e(k) - e(k - \tau_{m,n}(k))] - \sum_{i=k-\tau_{m,n}(k)}^{k-1} \delta(i) \\
&\quad - 2 \zeta_1^T(k) F_1 \left[ \sum_{i=k-\tau_M}^{k-\tau_{m,n}(k)-1} \delta(i) - e(k - \tau_{m,n}(k)) + e(k - \tau_M) \right] \\
[0150] \quad &= \zeta_1^T(k) [\Pi_{11} + \Pi_{12}^T P_1^{-1} \Pi_{12} + \Gamma_{11}^T + \Gamma_{11} + \tau_M \Gamma_{12}^T R_1^{-1} \Gamma_{12} + \tau_M M_1] \zeta_1(k) \\
&\quad - \sum_{i=k-\tau_{m,n}(k)}^{k-1} [\zeta_1^T \quad \delta^T(i)] \begin{bmatrix} M_1 & E_1 \\ * & \gamma_1^{\tau_M} R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \delta(i) \end{bmatrix} - \sum_{i=k-\tau_M+1}^{k-\tau_{m,n}(k)-1} [\zeta_1^T \quad \delta^T(i)] \begin{bmatrix} M_1 & F_1 \\ * & \gamma_1^{\tau_M} R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \delta(i) \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{16}$$

[0151] 其中,  $\zeta_1(k) = \begin{bmatrix} e^T(k) & F^T(e(k)) & e^T(k - \tau_M) & e^T(k - \tau_{m,n}(k)) & e_{m,n}^T(k) \end{bmatrix}^T$

$$[0152] \quad \Pi_{11} = \begin{bmatrix} -\gamma_1 P_1 + Q_1 - 2\tilde{U}_1 & -\tilde{U}_2 & 0 & 0 & 0 \\ * & -2I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma_1^{\tau_M} Q_1 & 0 & 0 \\ * & * & * & \sigma\Omega & 0 \\ * & * & * & * & -\Omega \end{bmatrix}$$

$$[0153] \quad \Pi_{12} = [P_1(W \otimes \Gamma + \bar{A}) \quad P_1 \quad 0 \quad X \quad X]^T$$

$$[0154] \quad \Gamma_{11} = [E_1 \quad 0 \quad -F_1 \quad -E_1 + F_1 \quad 0]$$

$$[0155] \quad \Gamma_{12} = [\sqrt{\tau_M} P_1(W \otimes \Gamma + \bar{A} - I) \quad \sqrt{\tau_M} P_1 \quad 0 \quad \sqrt{\tau_M} X \quad \sqrt{\tau_M} X]^T$$

$$[0156] \quad \tilde{U}_1 = \frac{\hat{U}_1^T \hat{U}_2 + \hat{U}_2^T \hat{U}_1}{2}, \quad \tilde{U}_2 = -\frac{\hat{U}_1^T + \hat{U}_2^T}{2}, \quad \hat{U}_1 = \text{diag}_N \{U_1\}, \quad \hat{U}_2 = \text{diag}_N \{U_2\},$$

[0157] 故可得,  $V^1(k+1) \leq \gamma_1 V^1(k)$ 。

[0158] 当  $k \in I_{2,n}$  时,  $s=2$ 。

$$\Delta V^2(k) = \Delta V_1^2(k) + \Delta V_2^2(k) + \Delta V_3^2(k)$$

$$\leq e^T(k+1)P_2e(k+1) - \gamma_2 e^T(k)P_2e(k) + e^T(k)Q_2e(k) - \gamma_2^{\tau_M} e^T(k-\tau_M)Q_2e(k-\tau_M)$$

$$+ \tau_M \delta^T(k)R_2\delta(k) - \sum_{i=k-\tau_M}^{k-1} \gamma_2^{\tau_M} \delta^T(i)R_2\delta(i)$$

$$+ \tau_M \zeta_2^T(k)M_2\zeta_2(k) - \sum_{i=k-\tau_M}^{k-1} \zeta_2^T(k)M_2\zeta_2(k)$$

$$+ 2\zeta_2^T(k)E_2[e(k) - e(k-\tau_{m,n}(k))] - \sum_{i=k-\tau_{m,n}(k)}^{k-1} \delta(i)]$$

[0159]

$$- 2\zeta_2^T(k)F_2 \left[ \sum_{i=k-\tau_M}^{k-\tau_{m,n}(k)-1} \delta(i) - e(k-\tau_{m,n}(k)) + e(k-\tau_M) \right]$$

$$- 2 \begin{bmatrix} e(k) \\ F(e(k)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \tilde{U}_1 & \tilde{U}_2 \\ * & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e(k) \\ F(e(k)) \end{bmatrix}$$

$$= \zeta_2^T(k) [\Pi_{21} + \Pi_{22}^T P_2^{-1} \Pi_{22} + \Gamma_{21}^T + \Gamma_{21} + \tau_M \Gamma_{22}^T R_2^{-1} \Gamma_{22} + \tau_M M_2] \zeta_2(k)$$

$$- \sum_{i=k-\tau_{m,n}(k)}^{k-1} [\zeta_2^T \quad \delta^T(i)] \begin{bmatrix} M_2 & E_2 \\ * & \gamma_2^{\tau_M} R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_2 \\ \delta(i) \end{bmatrix} - \sum_{i=k-\tau_M+1}^{k-\tau_{m,n}(k)-1} [\zeta_2^T \quad \delta^T(i)] \begin{bmatrix} M_2 & F_2 \\ * & \gamma_2^{\tau_M} R_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \zeta_2 \\ \delta(i) \end{bmatrix} \quad (17)$$

[0160] 其中,  $\zeta_2(k) = [e^T(k) \quad F^T(e(k)) \quad e^T(k-\tau_M) \quad e^T(k-\tau_{m,n}(k))]^T$ ,

$$[0161] \quad \Pi_{21} = \begin{bmatrix} -\gamma_2 P_2 + Q_2 - 2\tilde{U}_1 & -\tilde{U}_2 & 0 & 0 \\ * & -2I & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma_2^{\tau_M} Q_2 & 0 \\ * & * & * & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0162] \quad \Pi_{22} = [P_2(W \otimes \Gamma + \bar{A}) \quad P_2 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$[0163] \quad \Gamma_{21} = [E_2 \quad 0 \quad -F_2 \quad -E_2 + F_2]$$

$$[0164] \quad \Gamma_{22} = [\sqrt{\tau_M} R_2(W \otimes \Gamma + \bar{A} - I) \quad \sqrt{\tau_M} R_2 \quad 0 \quad 0]^T$$

[0165] 故可得,  $V^2(k+1) \leq \gamma_2 V^2(k)$ 。

[0166] 接下来分析两端点处时刻泛函之间的关系:

[0167] 当  $k=h_n$  时刻, 由  $P_1 \leq u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} P_2$ 、 $Q_s \leq u_{3-s} Q_{3-s}$ 、 $R_s \leq u_{3-s} R_{3-s}$  可得:

$$\begin{aligned}
 V^1((h_n)^+) &= e^T((h_n)^+) P_1 e((h_n)^+) + \sum_{i=h_n-\tau_M}^{h_n-1} \gamma_1^{h_n-i-1} e^T(i) Q_1 e(i) + \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \sum_{i=j+h_n}^{h_n-1} \gamma_1^{h_n-i-1} \delta(i) R_1 \delta^T(i) \\
 &\leq u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} e^T(h_n) P_2 e(h_n) + u_2 \sum_{i=h_n-\tau_M}^{h_n-1} \gamma_1^{h_n-i-1} e^T(i) Q_2 e(i) + u_2 \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \sum_{i=j+h_n}^{h_n-1} \gamma_1^{h_n-i-1} \delta(i) R_2 \delta^T(i) \\
 [0168] \quad &= u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} e^T((h_n)^-) P_2 e((h_n)^-) + u_2 \sum_{i=h_n-\tau_M}^{h_n-1} \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{h_n-i-1} \gamma_2^{h_n-i-1} e^T(i) Q_2 e(i) \\
 &\quad + u_2 \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \sum_{i=j+h_n}^{h_n-1} \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{h_n-i-1} \gamma_2^{h_n-i-1} \delta(i) R_2 \delta^T(i) \\
 &\leq u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} V^2((h_n)^-)
 \end{aligned} \tag{18}$$

[0169] 当  $k=h_n+b_n$  时刻, 由  $P_2 \leq u_1 P_1$ 、 $Q_s \leq u_{3-s} Q_{3-s}$ 、 $R_s \leq u_{3-s} R_{3-s}$  可得:

$$\begin{aligned}
 V^2((h_n+b_n)^+) &= e^T((h_n+b_n)^+) P_2 e((h_n+b_n)^+) + \sum_{i=h_n+b_n-\tau_M}^{h_n+b_n-1} \gamma_2^{h_n+b_n-i-1} e^T(i) Q_2 e(i) \\
 &\quad + \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \sum_{i=j+h_n+b_n}^{h_n+b_n-1} \gamma_2^{h_n+b_n-i-1} \delta(i) R_2 \delta^T(i) \\
 [0170] \quad &\leq u_1 e^T((h_n+b_n)^-) P_1 e((h_n+b_n)^-) + u_1 \sum_{i=h_n+b_n-\tau_M}^{h_n+b_n-1} \gamma_2^{h_n+b_n-i-1} e^T(i) Q_1 e(i) \\
 &\quad + u_1 \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \sum_{i=j+h_n+b_n}^{h_n+b_n-1} \gamma_2^{h_n+b_n-i-1} \delta(i) R_1 \delta^T(i) \\
 &\leq u_1 V^1((h_n+b_n)^-)
 \end{aligned} \tag{19}$$

[0171] 故, 由上述两端点的不等式(18)、(19)可得:

$$[0172] \quad \begin{cases} V^{1+} \leq u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} V^{2-}, & k \in D_{1,n} \cap I_{1,n} \\ V^{2+} \leq u_1 V^{1-}, & k \in I_{2,n} \end{cases} \tag{20}$$

[0173] 继而有下列式成立, 当  $k \in I_{1,n}$

$$\begin{aligned}
 V^1(k+1) &\leq \gamma_1 V^1(k) \leq \gamma_1^{I_1} V^1((h_n+b_n)^+) \leq u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} \gamma_1^{I_1} V^2((h_n+b_n)^-) \\
 &\leq u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} \gamma_1^{I_1} \gamma_2^{k-I_2} V^2((h_n)^+) \leq u_1 u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} \gamma_1^{I_1} \gamma_2^{k-I_2} V^1((h_n)^-) \\
 [0174] \quad &\leq u_1 u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} \gamma_1^{I_1} \gamma_2^{k-I_2} V^1((h_{n-1}+b_{n-1})^+) \\
 &\leq \dots \leq \left[ u_1 u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} \right]^n \gamma_1^{N_{\sigma_1}(k,0)} \gamma_2^{N_{\sigma_2}(k,0)} V^1(0) u^*
 \end{aligned} \tag{21}$$

[0175] 当  $k \in I_{2,n}$



$$\begin{aligned}
V^2(k+1) &\leq \gamma_2 V^2(k) \leq \gamma_2^{I_{2,s}} V^2((h_n)^+) \leq u_1 \gamma_2^{k-I_{2,s}} V^1((h_n)^-) \\
&\leq u_1 \gamma_1^{I_{1,s}} \gamma_2^{k-I_{2,s}} V^1((h_n + b_n)^+) \leq u_1 u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} \gamma_1^{I_{1,s}} \gamma_2^{k-I_{2,s}} V^2((h_{n+1} + b_{n+1})^-) \\
[0176] \quad &\leq u_1 u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} \gamma_1^{I_{1,s}} \gamma_2^{k-I_{2,s}-I_{2,s-1}} V^2((h_{n+1})^-) \\
&\leq \dots \leq \left[ u_1 u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} \right]^n \gamma_1^{N_{\sigma_1}(k,0)} \gamma_2^{N_{\sigma_2}(k,0)} V^1(0) u^*
\end{aligned} \tag{22}$$

[0177] 故,由(21)、(22)可得,能量函数在分段区间内都存在:

$$\begin{aligned}
V^s(k+1) &\leq \left[ u_1 u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} \right]^n \gamma_1^{N_{\sigma_1}(k,0)} \gamma_2^{N_{\sigma_2}(k,0)} V^1(0) u^* \\
[0178] \quad &\leq \left[ u_1 u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} \gamma_1^{\frac{T}{T_{off}}} \gamma_2^{\frac{T}{T-T_{off}}} \right]^n V^1(0) u^* \\
&\leq \bar{\gamma}^n V^1(0) u^*
\end{aligned} \tag{23}$$

[0179] 其中,  $\bar{\gamma} = u_1 u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} \gamma_1^{\frac{T}{T_{off}}} \gamma_2^{\frac{T}{T-T_{off}}}$ ,  $u^* = \max \left\{ 1, \frac{1}{u_1} \left[ u_2 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma_2}\right)^{\tau_M-1} \right]^{-1} \right\}$ ,若使系统稳定,

$\bar{\gamma} \in (0,1)$ ,则对 $\bar{\gamma}$ 进行指对数运算可得:

$$[0180] \quad \ln u_1 u_2 + (\tau_M - 1) \ln \frac{\gamma_1}{\gamma_2} + T \left[ \frac{\ln \gamma_1}{T_{off}} + \frac{\ln \gamma_2}{T - T_{off}} \right] < 0 \tag{24}$$

[0181] 另外,由 $V(k+1) \leq \gamma V(k)$ 可知:

$$[0182] \quad V(k) \leq \gamma V(k-1) \leq \gamma^2 V(k-2) \leq \dots \leq \gamma^T V(0)$$

$$\begin{aligned}
V(0) &= e^T(0) P e(0) + \sum_{i=-\tau_M}^{-1} \gamma^{-i-1} e^T(i) Q e(i) + \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \sum_{i=j}^{-1} \gamma^{-i-1} \delta(i) R \delta^T(i) \\
[0183] \quad &\leq m_1 a_1 + m_1 a_2 \sum_{i=-\tau_M}^{-1} \gamma^{-i-1} + \omega a_3 \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \sum_{i=j}^{-1} \gamma^{-i-1} \\
&\leq m_1 (a_1 + o_1 a_2) + \omega a_3 \\
&= m_1 L_1 + \omega L_2
\end{aligned}$$

$$[0184] \quad \text{其中, } \delta^T(k) \delta(k) \leq \omega, o_1 = \sum_{i=-\tau_M}^{-1} \gamma^{-i-1} = \frac{\gamma^{\tau_M-1}(1-\gamma^{\tau_M})}{1-\gamma}, o_2 = \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \sum_{i=j+1}^{-1} \gamma^{-i-1} = \frac{1-\gamma^{\tau_M-1}-\gamma^{\tau_M}+\gamma^{2\tau_M-2}}{1-\gamma^2},$$

$$L_1 = a_1 + o_1 a_2, L_2 = o_2 a_3.$$

[0185] 故, $V(k) < \gamma^T [m_1 L_1 + \omega L_2]$ ,又因为 $V(k) \geq \lambda_{\min}(P) e^T(k) e(k)$ ,可得:

$$[0186] \quad e^T(k) e(k) \leq \frac{\gamma^T [m_1 L_1 + \omega L_2]}{\lambda_{\min}(P)} = m_2$$

$$[0187] \quad \text{则息停时间为 } T = \begin{cases} \log_{\gamma} \frac{m_2 \lambda_{\min}(P)}{m_1 L_1 + \omega L_2}, & m_2 < \frac{m_1 L_1 + \omega L_2}{\lambda_{\min}(P)} \\ 0, & m_2 \geq \frac{m_1 L_1 + \omega L_2}{\lambda_{\min}(P)} \end{cases}.$$

[0188] 对于所有的 $i=1,2,\dots,N$ ,给定标量 $0 < \gamma_s < 1, \sigma_i, \kappa, \omega, 0 < m_1 < m_2, u_1, u_2 (s=1,$

2),若存在正定矩阵 $P_s$ 、 $Q_s$ 、 $R_s$ 、 $X$ ,以及对应维数矩阵 $W>0$ 、 $E_s$ 、 $F_s$ 、 $M_s$ ,正标量 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ ,满足如下不等式,则同步误差系统在有限时间内是有界的,即离散复杂网络是有限时间同步的:

$$\begin{aligned}
 & \Pi_{11} + \Pi_{12}^T P_1^{-1} \Pi_{12} + \Gamma_{11}^T + \Gamma_{11} + \tau_M \Gamma_{12}^T R_1^{-1} \Gamma_{12} + \tau_M M_1 < 0 \\
 & \Pi_{21} + \Pi_{22}^T P_2^{-1} \Pi_{22} + \Gamma_2^T + \Gamma_2 + \tau_M M_2 < 0 \\
 [0189] \quad & \begin{bmatrix} M_s & E_s \\ * & \gamma_s^{\tau_M} R_s \end{bmatrix} > 0, \quad s=1,2 \\
 & \begin{bmatrix} M_s & F_s \\ * & \gamma_s^{\tau_M} R_s \end{bmatrix} > 0, \quad s=1,2
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 & P_1 \leq u_2 \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{\tau_M - 1} P_2 \\
 [0190] \quad & P_2 \leq u_1 P_1 \\
 & Q_s \leq u_{3-s} Q_{3-s} \\
 & R_s \leq u_{3-s} R_{3-s}
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$[0191] \quad \ln u_1 u_2 + (\tau_M - 1) \ln \frac{\gamma_1}{\gamma_2} + T \left[ \frac{\ln \gamma_1}{T_{off}} + \frac{\ln \gamma_2}{T - T_{off}} \right] < 0$$

[0192] 其中,

$$[0193] \quad \Pi_{11} = \begin{bmatrix} -\gamma_1 P_1 + Q_1 - 2\tilde{U}_1 & -\tilde{U}_2 & 0 & 0 & 0 \\ * & -2I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma_1^{\tau_M} Q_1 & 0 & 0 \\ * & * & * & \sigma W & 0 \\ * & * & * & * & -W \end{bmatrix}$$

$$[0194] \quad \Pi_{21} = \begin{bmatrix} -\gamma_2 P_2 + Q_2 - 2\tilde{U}_1 & -\tilde{U}_2 & 0 & 0 \\ * & -2I & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma_2^{\tau_M} Q_2 & 0 \\ * & * & * & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0195] \quad \Pi_{12} = [P_1(W \otimes \Gamma + \bar{A}) \quad P_1 \quad 0 \quad X \quad X]^T$$

$$[0196] \quad \Pi_{22} = [P_2(W \otimes \Gamma + \bar{A}) \quad P_2 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$[0197] \quad \Gamma_{11} = [E_1 \quad 0 \quad -F_1 \quad -E_1 + F_1 \quad 0]$$

$$[0198] \quad \Gamma_{12} = [\sqrt{\tau_M} P_1(W \otimes \Gamma + \bar{A} - I) \quad \sqrt{\tau_M} P_1 \quad 0 \quad \sqrt{\tau_M} X \quad \sqrt{\tau_M} X]^T$$

$$[0199] \quad \Gamma_{21} = [E_2 \quad 0 \quad -F_2 \quad -E_2 + F_2]$$

$$[0200] \quad \Gamma_{22} = [\sqrt{\tau_M} R_2(W \otimes \Gamma + \bar{A} - I) \quad \sqrt{\tau_M} R_2 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$[0201] \quad \tilde{U}_1 = \frac{\hat{U}_1^T \hat{U}_2 + \hat{U}_2^T \hat{U}_1}{2}, \quad \tilde{U}_2 = -\frac{\hat{U}_1^T + \hat{U}_2^T}{2}, \quad \hat{U}_1 = \text{diag}_N \{U_1\}, \quad \hat{U}_2 = \text{diag}_N \{U_2\}$$

$$[0202] \quad \alpha_1 = \sum_{i=-\tau_M}^{-1} \gamma^{-i-1} = \frac{\gamma^{\tau_M-1}(1-\gamma^{\tau_M})}{1-\gamma}, \quad \alpha_2 = \sum_{j=-\tau_M}^{-1} \sum_{i=j+1}^{-1} \gamma^{-i-1} = \frac{1-\gamma^{\tau_M-1}-\gamma^{\tau_M}+\gamma^{2\tau_M-2}}{1-\gamma^2} \tag{16}$$

[0203] 控制器增益 $K=XP^{-1}$ , 息停时间为 $T = \begin{cases} \log_{\gamma} \frac{m_2 \lambda_{\min}(P)}{m_1 L_1 + \omega L_2}, & m_2 < \frac{m_1 L_1 + \omega L_2}{\lambda_{\min}(P)} \\ 0, & m_2 \geq \frac{m_1 L_1 + \omega L_2}{\lambda_{\min}(P)} \end{cases}$ 。

[0204] 下面通过一个实例, 借助matlab进行仿真分析, 验证所述方法的有效性。

[0205] 考虑一个三个节点的复杂网络系统, 设置系统参数如下:

[0206]  $A = \begin{bmatrix} 0.1 & 0.03 \\ 0.1 & -0.1 \end{bmatrix}$ ,  $W = \begin{bmatrix} -0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & -0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & -0.2 \end{bmatrix}$ ,  $\Gamma = 0.1I$ ,  $\gamma_1 = 2$ ,  $\gamma_2 = 0.9$ ,  $\kappa = 2$ ,  $u_1 =$

$u_2 = 1.05$ ,  $T = 9$ ,  $T_{\text{off}} = 5$ ,  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0.11$ ,  $\tau_M = 1$ 。

[0207] 选取的非线性函数为 $f(x_i(k)) = \begin{bmatrix} -0.5x_{i(1)}(k) + \tanh(0.05x_{i(2)}(k)) \\ 0.45x_{i(2)}(k) - \tanh(0.05x_{i(1)}(k) + 0.05x_{i(2)}(k)) \end{bmatrix}$ , 利用

matlab的LMI工具箱进行求解线性矩阵不等式得:

[0208]  $K_1 = K_2 = K_3 = \begin{bmatrix} 0.1398 & -0.0283 \\ -0.0316 & 0.0813 \end{bmatrix}$ ,  $\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega_3 = \begin{bmatrix} 0.9237 & 0.0033 \\ 0.0033 & 1.2669 \end{bmatrix}$ , 息停时间为52s。

[0209] 通过仿真分析, 原系统在未施加控制情况下的开环响应曲线如图2所示, 可以看到, 原系统是不稳定的。图3表示系统的同步误差模型的响应曲线, 经过控制器作用, 系统可以达到稳定。图4绘制了DoS攻击的情况和闭环误差系统联合表示, 以更直观地显示本方法对于攻击的处理效果。图5绘制了DoS攻击存在情况下的系统的触发时刻序列图。

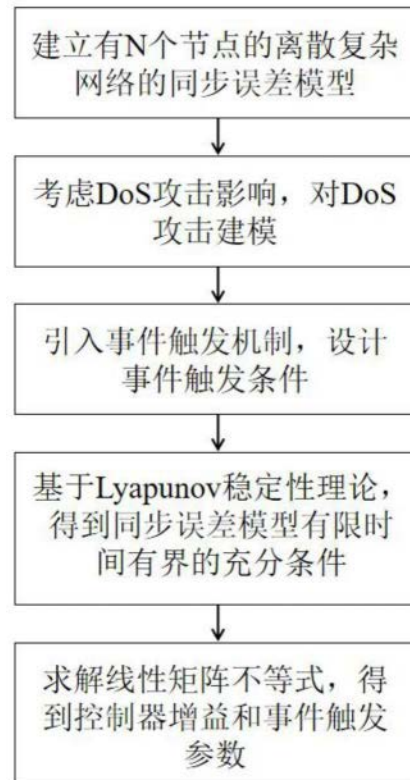


图1

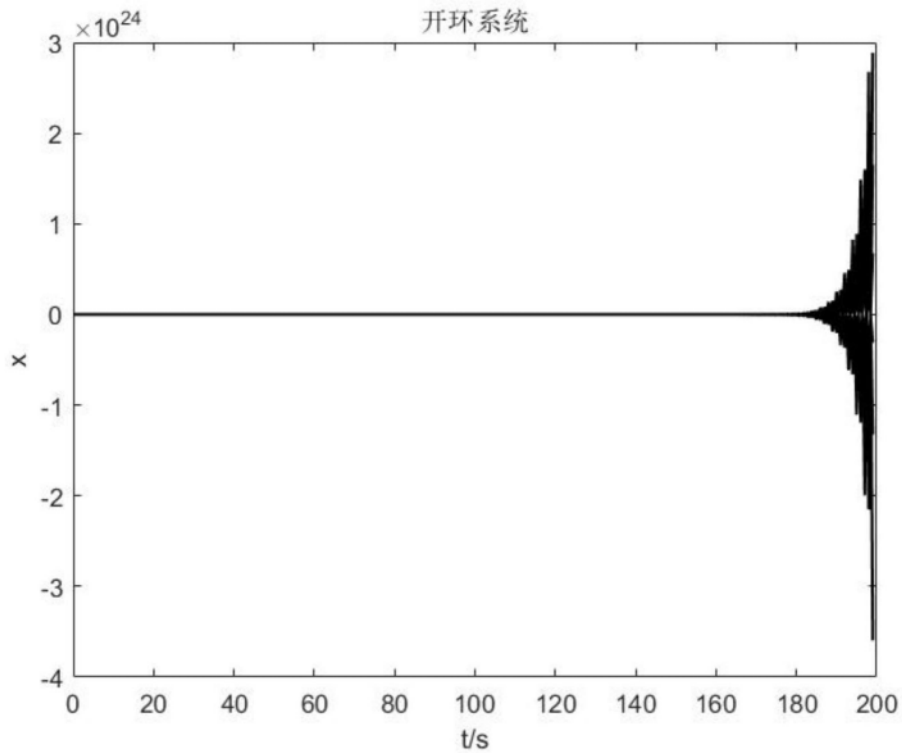


图2

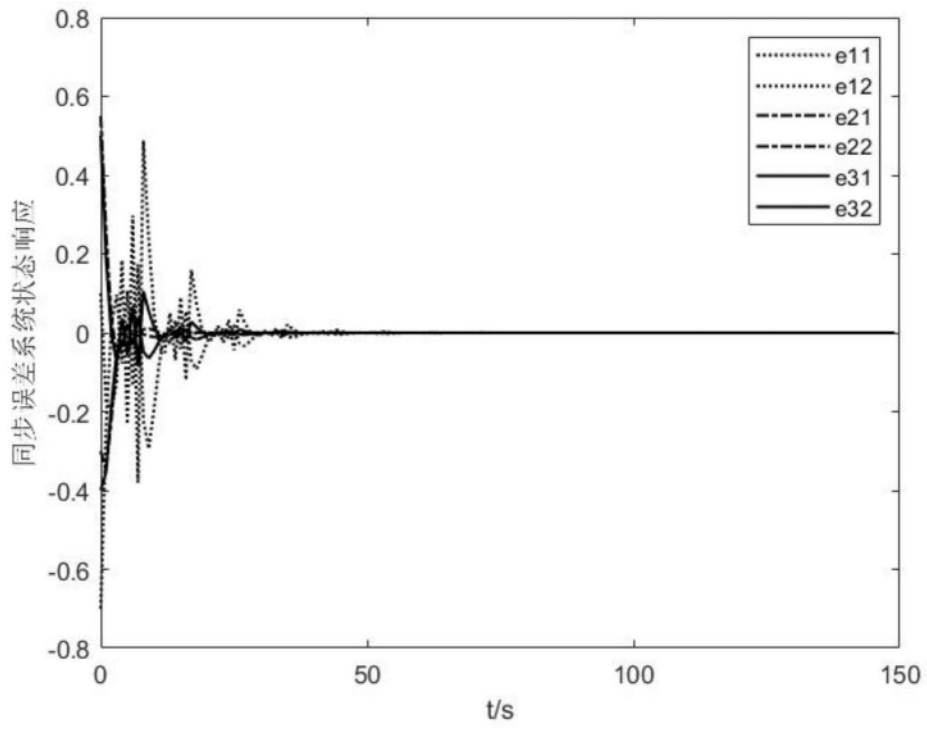


图3

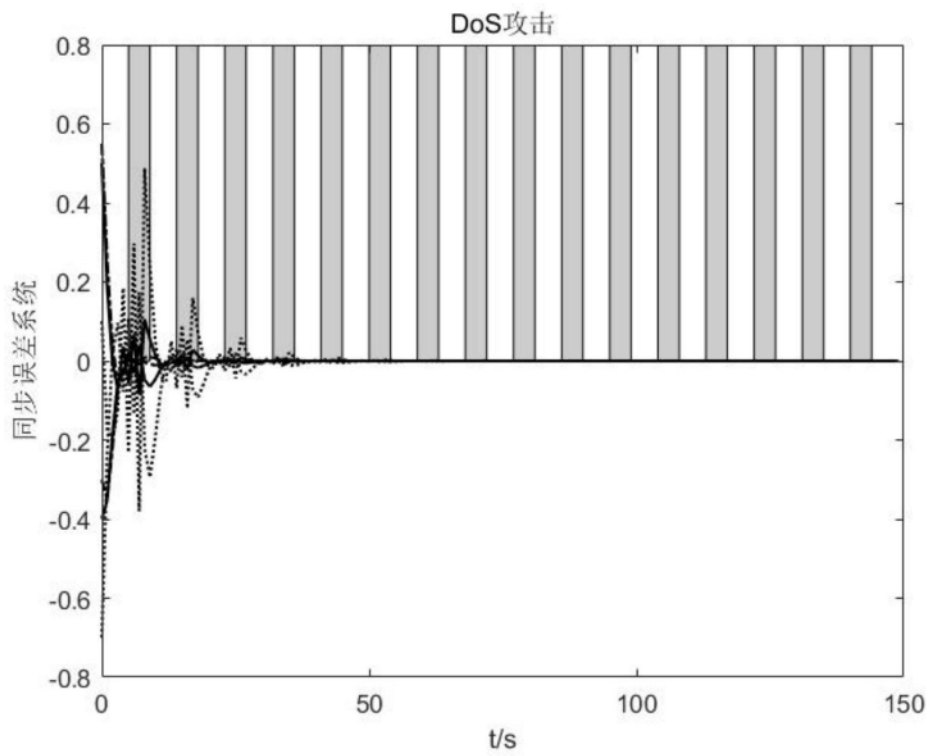


图4

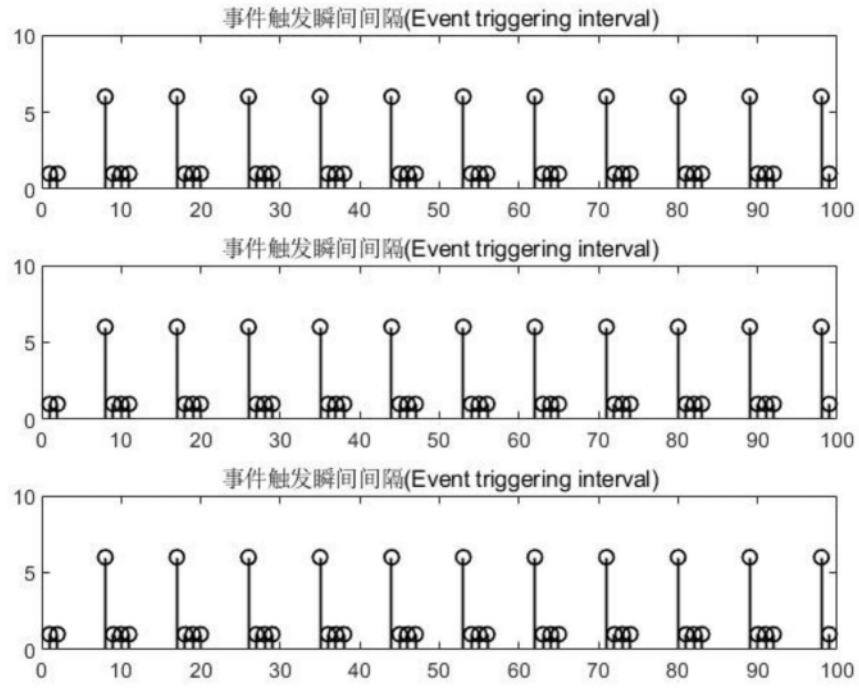


图5