

基于自适应事件触发的时滞系统分布式 l_2-l_∞ 滤波

乔伟豪¹, 朱凤增¹, 彭力^{1,2†}

- (1. 江南大学 物联网应用技术教育部工程中心, 江苏 无锡 214122;
2. 无锡太湖学院 江苏省物联网应用技术重点建设实验室, 江苏 无锡 214064)

摘要: 研究一类基于自适应事件触发机制的时滞系统分布式滤波问题. 自适应事件触发条件由滤波器自身最新释放数据、当前时刻估计值及邻居节点最新释放数据共同决定. 此事件触发机制采用阈值自适应调节方案, 阈值参数在保证滤波器性能的前提下根据滤波误差动态变化, 最大程度上节约网络通信资源. 首先, 给出滤波误差系统均方指数稳定的充分条件; 其次, 构造一个 Lyapunov 函数来分析滤波误差系统满足 l_2-l_∞ 的性能指标; 再次, 设计离散时滞系统分布式 l_2-l_∞ 滤波器, 并通过线性矩阵不等式方法求解滤波器参数; 最后, 通过仿真实例说明滤波器能够降低系统时滞带来的影响, 且在保证滤波性能前提下减少通信次数, 节约网络资源.

关键词: 分布式滤波; 自适应事件触发; l_2-l_∞ 性能; 传感器网络; 时滞系统

中图分类号: TP13 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1281

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 乔伟豪, 朱凤增, 彭力. 基于自适应事件触发的时滞系统分布式 l_2-l_∞ 滤波[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 1074-1080.

Distributed l_2-l_∞ filtering based on adaptive event triggering for time-delay systems

QIAO Wei-hao¹, ZHU Feng-zeng¹, PENG Li^{1,2†}

- (1. Research Center of Engineering Applications for IOT, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Jiangsu Province Internet of Things Application Technology Key Construction Laboratory, Wuxi Taihu College, Wuxi 214064, China)

Abstract: This paper studies the distributed filtering problem for time-delay systems under an adaptive event-trigger mechanism. An adaptive event trigger mechanism relies on the latest data released and an approximate value estimated by the filter, and the latest data from the neighbor filters. The threshold of the mechanism changes adaptively to minimize the filtering error in order to ensure the high performance of filtering and reduces the network resources consumption as much as possible. Firstly, this paper presents the sufficient conditions that stabilize the exponential mean-square of the filtering error manage system. Secondly, a Lyapunov function is constructed to analyze required performance when the filtering error manage system reaches the l_2-l_∞ . Then, we design a discrete time-delay disturbed l_2-l_∞ filtering system, and acquire the triggering parameters solving the linear matrix inequalities. Finally, a simulation test is conducted to demonstrate that the designed filter can reduce the impact of time-delay, maintain efficiency and save the network resource.

Keywords: distributed filter; adaptive event triggering; l_2-l_∞ performance; sensor networks; time-delay systems

0 引言

无线传感器网络(WSN)由一定监测区域的多个传感器节点组成,传感器节点之间相互通信协同工作.由于传感器网络相对于单个传感器节点具有更好的稳定性和扩展性,被广泛应用于健康监测、工业自动化、智慧社区等领域^[1].随着传感器技术和通信技术的发展,基于WSN的分布式滤波问题受到越

来越多学者的关注,在分布式滤波问题的研究上取得了很多成果^[2-5].在有关分布式滤波问题的研究中, l_2-l_∞ 滤波方法针对系统模型中存在的确定性及外部噪声等问题有很好的滤波效果^[6-8].分布式滤波器的设计使用滤波器自身和邻居节点的估计信息,相较于单个传感器的集中式滤波具有更好的鲁棒性.

在大范围的传感器网络中,传感器通常由锂电池

收稿日期: 2020-09-14; 录用日期: 2021-01-11.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0400902); 国家自然科学基金项目(61873112); 江南大学研究生科研与实践创新计划项目(JNKY19_043).

†通讯作者. E-mail: pengli@jiangnan.edu.cn.

供电,且大量传感器节点通过网络通信传递数据,导致分布式滤波在提高鲁棒性的同时也带来了能耗和通信资源开销增大的问题.事件触发机制通过触发条件判断滤波器是否传输当前估计值到邻居节点,相较于周期采样的固定周期发送,事件触发在保持系统较好稳定性的前提下,能够有效地降低滤波器信息的发送频率,降低通信网络的负担.目前对于网络化控制系统事件触发的研究已具有一定成果,但传统的事件触发的阈值是预设常数,无法根据系统变化动态调节阈值,对于系统变化的适应性较差,会造成一定的通信资源浪费.因此,对事件触发参数的动态优化是非常具有研究意义的.文献[9]研究了网络系统自适应事件触发机制下 H_∞ 滤波,提出了一种自适应触发机制来节约网络资源;文献[10]研究了连续系统自适应事件触发机制下 H_∞ 跟踪控制,提出了一种改进的自适应事件触发方案,动态修改了事件触发阈值;文献[11]研究了自适应事件触发机制下一类具有随机非线性扰动的系统故障检测问题,通过自适应事件触发减少数据传输频率.但以上文献都是针对连续系统进行的研究,针对自适应事件触发机制下离散系统分布式滤波问题的研究不够丰富,且事件触发条件没有监测邻居节点信息.为此,本文提出一种针对离散系统的自适应事件触发机制,通过自身和邻居节点信息协作估计系统信号,并能够根据估计误差动态改变事件触发参数.

控制系统中,滞后现象普遍存在,系统自身信息内部传输和外部干扰等因素都会导致时滞现象出现,对系统整体稳定性产生很大的影响^[12].由于5G网络兴起,网络传输存在的时滞问题得到了一定的解决.因此,本文考虑的时滞是系统内部存在的时滞问题.文献[13]研究了具有随机时滞系统的 H_∞ 滤波问题;文献[14]研究了具有时变时滞非线性系统的 l_2-l_∞ 控制.由于系统时滞问题普遍存在,时滞系统的稳定性研究具有重要意义.本文的主要贡献如下:

1) 本文设计的分布式滤波器结合了事件触发机制,以节约传感器网络带来的网络资源开销增大问题,同时考虑系统的时滞现象.事件触发机制采用触发阈值动态调节的自适应触发方案,在保证滤波器性能的前提下有效地节约网络资源.

2) 考虑在很多工程应用中对滤波误差的峰值有度量要求,本文采用鲁棒 l_2-l_∞ 增益,可以保证滤波误差的峰值低于一定水平.

3) 构造Lyapunov函数分析滤波误差系统 l_2-l_∞ 性能及稳定性,通过线性矩阵不等式(LMI)技术设计

离散时滞系统分布式滤波器,使得滤波误差系统均方指数稳定且具有给定的 l_2-l_∞ 性能.

1 问题描述

考虑一个具有 n 个节点的传感器网络,拓扑结构由有向图 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$ 表示.其中: $\mathcal{V} = \{1, 2, \dots, n\}$ 为节点集, $\mathcal{E} \subseteq \mathcal{V} \times \mathcal{V}$ 为边界集, $\mathcal{A} = [a_{ij}]_{n \times n} (a_{ij} \geq 0)$ 为邻接矩阵.如果有向图 \mathcal{G} 存在一条从节点 j 到节点 i 的边界,则有序对 $(i, j) \in \mathcal{E}$,并且 $a_{ij} > 0$,并称节点 j 为节点 i 的一个相邻节点.此外,假定对于所有的 $i \in \mathcal{V}$,有 $a_{ii} = 1$,因此可以认为 (i, i) 是一条附加的边界.节点的所有相邻节点及本身构成的集合称为节点的相邻节点集,记为 $\mathcal{N}_i = \{j \in \mathcal{V} : (i, j) \in \mathcal{E}\}$. \mathcal{G} 的Laplacian矩阵为 $W = \mathcal{A} - \mathcal{L}$,其中 $\mathcal{L} = \text{diag}\{l_i\}$ 且 $l_i = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} a_{ij}$.

考虑如下具有时变时滞的离散系统:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + A_d x(k - \tau(k)) + Bw(k), \\ z(k) = Mx(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in \mathbf{R}^{n_x}$ 为系统状态向量; $w(k) \in \mathbf{R}^{n_w}$ 为外部扰动,属于 $l_2[0, \infty)$; $z(k) \in \mathbf{R}^{n_z}$ 为待估计信号; $\tau(k)$ 为时变时滞,且满足 $d_1 \leq \tau(k) \leq d_2$;系统矩阵 A, A_d, B, M 为已知的实矩阵.

传感器节点 $i (0 < i < n)$ 的模型如下:

$$y_i(k) = C_i x(k). \quad (2)$$

其中: $y_i(k) \in \mathbf{R}^{n_y}$ 为传感器节点 i 的测量值,系统矩阵 C_i 为已知的实矩阵.

自适应事件触发方案如图1所示.

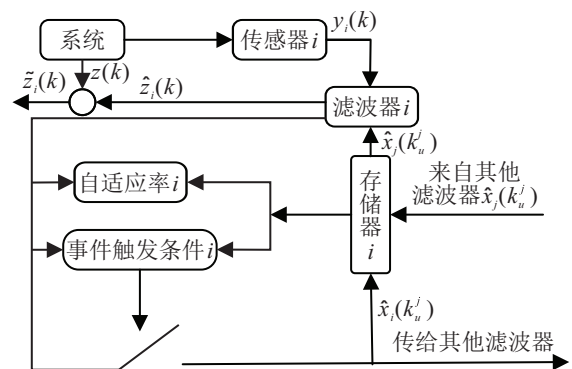


图1 自适应事件触发系统

图1中,传感器节点 i 测量数据为 $y_i(k)$,并将数据传递给对应的滤波器节点 i .网络中每个滤波器不仅获取传感器传输来的数据,还获取邻居滤波器节点的数据.滤波器节点中包含存储器,用来存储从邻居节点获取的系统估计数据.滤波器内部通过自适应触

发条件判断是否发送最新数据到邻居节点。存储器包含多个存储单元,通过数据到达时间戳判断哪条数据是邻居节点传输的最新数据,并丢弃旧数据。

基于上述自适应事件触发设计方案,定义滤波器节点*i*的自适应事件触发条件如下:

$$\eta_i^T(k)\Phi_{r(k)}\eta_i(k) \leq \sigma_i(k)g_i^T(k_u^i)\Phi_{r(k)}g_i(k_u^i). \quad (3)$$

其中: $\Phi_{r(k)} > 0$ 为待设计的事件触发矩阵; k 为当前采样时刻; k_u^i 为滤波器节点*i*在当前时刻之前最新的事件触发传输时刻; u 为事件触发时刻; $\eta_i(k)$ 和 $g_i(k_u^i)$ 分别为

$$\begin{aligned} \eta_i(k) &= \hat{x}_i(k_u^i) - \hat{x}_i(k), \\ g_i(k_u^i) &= \sum_{j \in \mathcal{N}_i} [\hat{x}_j(k_u^j) - \hat{x}_i(k_u^i)]. \end{aligned} \quad (4)$$

由于是自适应事件触发,考虑触发阈值 $\sigma_i(k)$ 是时变的,且满足如下方程:

$$\sigma_i(k+1) = \sigma_i(k) + d_i(k). \quad (5)$$

其中: $\sigma_i(0) \in [0, 1]$ 为触发阈值初始值,且

$$d_i(k) = \begin{cases} -0.1, & \eta_i^T(k)\eta_i(k) > \rho; \\ 0, & \eta_i^T(k)\eta_i(k) = \rho; \\ 0.1, & \eta_i^T(k)\eta_i(k) < \rho. \end{cases} \quad (6)$$

这里的 ρ 为非负常数,为了便于理论研究,假设触发阈值 $\sigma_i(k)$ 在区间 $[\sigma_m, \sigma_M]$ 内有界变化, σ_m 和 σ_M 表示 $\sigma_i(k)$ 的下界和上界.当 $\eta_i^T(k)\eta_i(k)$ 大于 ρ 时,代表最新传输数据与当前估计误差较大,需要减小 $\sigma_i(k)$ 增加事件触发的频率,当 $\sigma_i(k)$ 减小到 σ_m 时则不再减小,此时事件触发频率最大.当 $\eta_i^T(k)\eta_i(k)$ 小于 ρ 时,代表最新传输数据与当前估计误差较小,需要增加 $\sigma_i(k)$ 减少事件触发的频率,当 $\sigma_i(k)$ 增加至 σ_M 时则不再增加,此时事件触发频率最小。

注1 自适应事件触发条件由滤波器节点自身最新传输的数据与邻居节点最新传输数据共同决定,如式(3)所示. 阈值参数 $\sigma_i(k)$ 根据式(5)和(6)所示方案在 $[\sigma_m, \sigma_M]$ 中有界变化,参考了文献[15]中针对连续系统设计的参数变化方案。

注2 本文考虑的时滞是系统内部存在的时滞问题,例如管道中的蒸汽和流体的流动^[16],锅炉在给水处理的过程中,需要经过低加、除氧、高加等环节,导致在到达加药点时,锅炉给水过程需要一定时间才能到达工艺设备,此过程反映了系统内部时滞问题。

基于以上分析,针对传感器节点*i*设计的滤波器结构为

$$\begin{cases} \hat{x}_i(k+1) = A\hat{x}_i(k) + A_d\hat{x}_i(k-\tau(k)) + \\ \quad L_i(y_i(k) - C_i\hat{x}_i(k)) + \\ \quad \sum_{j \in \mathcal{N}_i} K_i(\hat{x}_j(k_u^j) - \hat{x}_i(k_u^i)), \\ \hat{z}_i(k) = M\hat{x}_i(k). \end{cases} \quad (7)$$

其中: $\hat{x}_i(k)$ 为滤波器节点*i*的状态估计, $\hat{z}_i(k)$ 为对信号 $z(k)$ 的估计, L_i 、 K_i 为需要确定的滤波器节点*i*的参数。

令 $e_i(k) = x(k) - \hat{x}_i(k)$, $\tilde{z}_i(k) = z(k) - \hat{z}_i(k)$,则节点*i*的触发采样数据 $\hat{x}_i(k_u^i)$ 可表示为 $\hat{x}_j(k_u^j) - \hat{x}_i(k_u^i) = \eta_j(k) - \eta_i(k) + e_j(k) - e_i(k)$,结合式(1)和(7),可得如下滤波误差系统:

$$\begin{cases} e_i(k+1) = Ae_i(k) + A_de_i(k-\tau(k)) + \\ \quad B\omega(k) - L_iC_ie_i(k) - \\ \quad \sum_{j \in \mathcal{N}_i} K_i(\eta_j(k) - \eta_i(k)) + \\ \quad \sum_{j \in \mathcal{N}_i} K_i(e_j(k) - e_i(k)), \\ \tilde{z}_i(k) = Me_i(k). \end{cases} \quad (8)$$

为了表述方便,考虑*n*个滤波器节点,定义*k*时刻误差估计向量 $e(k) = [e_1(k) \ e_2(k) \ \dots \ e_n(k)]^T$,*k*时刻事件触发最新传输数据与当前时刻估计值误差 $\eta(k) = [\eta_1(k) \ \eta_2(k) \ \dots \ \eta_n(k)]^T$,输出误差估计向量 $\tilde{z}(k) = [\tilde{z}_1(k) \ \tilde{z}_2(k) \ \dots \ \tilde{z}_n(k)]^T$,以及系统参数向量 $\bar{A} = I_n \otimes A$, $\bar{A}_d = I_n \otimes A_d$, $\bar{C} = \text{diag}\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, $\bar{M} = I_n \otimes M$, $\bar{W} = W \otimes I$, $\bar{B} = 1_n \otimes B$.考虑滤波器参数向量 $\bar{L} = \text{diag}\{L_1, L_2, \dots, L_n\}$, $\bar{K} = \text{diag}\{K_1, K_2, \dots, K_n\}$.张量符号 \otimes 代表克罗内克积。

系统(8)被增广为如下形式:

$$\begin{cases} e(k+1) = \tilde{A}_1e(k) + \tilde{A}_2e(k-\tau(k)) + \\ \quad \tilde{B}\omega(k) + \tilde{C}\eta(k), \\ \tilde{z}(k) = \tilde{M}e(k). \end{cases} \quad (9)$$

其中: $\tilde{A}_1 = \bar{A} - \bar{L}\bar{C} + \bar{K}\bar{W}$, $\tilde{A}_2 = \bar{A}_d$, $\tilde{B} = \bar{B}$, $\tilde{C} = -\bar{K}\bar{W}$, $\tilde{M} = \bar{M}$.

定义1 本文的目标是设计形式如式(7)的滤波器,使得:1)在外部扰动 $\omega(k) = 0$ 的情况下,增广的滤波误差系统是均方指数稳定的;2)在零初始条件下,滤波误差系统(9)具有 l_2 - l_∞ 性能,即

$$\|\tilde{z}(k)\|_\infty^2 < \gamma^2\|\omega(k)\|_2^2, \quad \forall \omega(k) \neq 0. \quad (10)$$

其中

$$\|\tilde{z}(k)\|_\infty^2 = \sup_k \{\tilde{z}^T(k)\tilde{z}(k)\},$$

$$\|\omega(k)\|_2^2 = \sum_{k=0}^{\infty} \omega^T(k)\omega(k).$$

引理1^[17] $V(k) = e^T(k)Pe(k)$ 为Lyapunov 函数, 如果存在实数 $\lambda \geq 0, \mu > 0, \nu > 0$ 和 $0 < \psi < 1$, 使得

$$\mu\|e(k)\|^2 \leq V(k) \leq \nu\|e(k)\|^2 \quad (11)$$

和

$$V(k+1) - V(k) \leq \lambda - \psi V(k), \quad (12)$$

则有

$$\|e(k)\|^2 \leq \frac{\nu}{\mu}(1-\psi)^k\|e(0)\|^2 + \frac{\lambda}{\mu\psi}. \quad (13)$$

引理2^[18] 如果存在一个对称矩阵 $P > 0$ 使得 $A^T P A - P < 0$, 则存在一个对称矩阵 P 和矩阵 G , 使得

$$\begin{bmatrix} P & A^T G^T \\ G A & G + G^T - P \end{bmatrix} > 0. \quad (14)$$

2 l_2 - l_∞ 滤波分析

本节中, 先给出使得滤波误差系统(9)均方指数稳定并且具有 l_2 - l_∞ 性能的充分条件.

定理1 给定 $\gamma > 0$, 如果存在正定矩阵 P, S 和矩阵 \bar{K}, \bar{L} 使得

$$\begin{bmatrix} \Xi_{11} & * & * & * & * \\ 0 & \Xi_{22} & * & * & * \\ \Xi_{31} & 0 & \Xi_{33} & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \Xi_{44} & * \\ \Xi_{51} & \Xi_{52} & \Xi_{53} & \Xi_{54} & \Xi_{55} \end{bmatrix} < 0, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} -P & * \\ \bar{M} & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

成立, 则滤波误差系统(9)是均方指数稳定的, 并且具有给定的 l_2 - l_∞ 性能, 其中

$$\Xi_{11} = -P + (d_2 - d_1 + 1)S + \sigma_M \tilde{W} \Phi \tilde{W},$$

$$\Xi_{22} = -S, \Xi_{31} = -\sigma_M \tilde{W} \Phi \tilde{W}, \Xi_{33} = \sigma_M \tilde{W} \Phi \tilde{W} - I,$$

$$\Xi_{44} = -I, \Xi_{51} = P\tilde{A}_1, \Xi_{52} = P\tilde{A}_2, \Xi_{53} = P\tilde{C},$$

$$\Xi_{54} = P\tilde{B}, \Xi_{55} = -P.$$

证明 首先证明系统(9)是均方稳定的, 此时 $\omega(k) = 0, \eta(k) = 0$. 取Lyapunov 函数

$$V_1(k) = e^T(k)Pe(k), \quad (17)$$

$$V_2(k) = \sum_{i=k-\tau(k)}^{k-1} e^T(i)Se(i), \quad (18)$$

$$V_3(k) = \sum_{j=k-d_2+1}^{k-d_1} \sum_{i=j}^{k-1} e^T(i)Se(i). \quad (19)$$

其中: $P > 0, S > 0$. 则有

$$\begin{cases} \Delta V_1(k) = e^T(k+1)Pe(k+1) - e^T(k)Pe(k), \\ \Delta V_2(k) = e^T(k)Se(k) + \sum_{i=k-d_2+1}^{k-d_1} e^T(i)Se(i) - e^T(k-\tau(k))Se(k-\tau(k)), \\ \Delta V_3(k) = (d_2 - d_1)e^T(k)Se(k) - \sum_{i=k-d_2+1}^{k-d_1} e^T(i)Se(i). \end{cases} \quad (20)$$

那么

$$\Delta V(k) = \Delta V_1(k) + \Delta V_2(k) + \Delta V_3(k) = \xi^T(k)\Lambda_1\xi(k) + \xi^T(k)\Lambda_2\xi(k). \quad (21)$$

其中

$$\begin{aligned} \xi(k) &= [e^T(k) \quad e^T(k-\tau(k))]^T, \\ \Lambda_1 &= \begin{bmatrix} -P + \tilde{A}_1^T P \tilde{A}_1 & * \\ \tilde{A}_2^T P \tilde{A}_1 & \tilde{A}_2^T P \tilde{A}_2 \end{bmatrix}, \\ \Lambda_2 &= \begin{bmatrix} (d_2 - d_1 + 1)S & * \\ 0 & -S \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

由Schur补引理可知, 式(15)隐含 $\Lambda_1 + \Lambda_2 < 0$, 因此有

$$\begin{aligned} \Delta V(k) &= \xi^T(k)\Lambda_1\xi(k) + \xi^T(k)\Lambda_2\xi(k) \leq \\ &= -\lambda_{\min}(-\Lambda_1)\xi^T(k)\xi(k) - \\ &= \lambda_{\min}(-\Lambda_2)\xi^T(k)\xi(k) \leq \\ &= -\alpha_1\xi^T(k)\xi(k) - \alpha_2\xi^T(k)\xi(k). \end{aligned} \quad (22)$$

其中: $0 < \alpha_1 < \lambda_{\min}(-\Lambda_1), 0 < \alpha_2 < \lambda_{\min}(-\Lambda_2)$.

存在 α_1, α_2 同时也满足 $0 < \alpha_1 < \lambda_{\min}(P)$, 则有

$$\Delta V(k) \leq -(\alpha_1 + \alpha_2)V(k)/\lambda_{\max}(P) + \lambda_{\max}(S) = -\psi V(k). \quad (23)$$

不难看出 $0 < \psi < 1$.

由引理1可以得到

$$\|\xi(k)\|^2 \leq \frac{\nu}{\mu}(1-\psi)^k\|\xi(k)\|^2, \quad (24)$$

即系统(9)是均方指数稳定的.

定义性能函数为

$$\begin{aligned} J &= V(k) - V(0) - \sum_{i=0}^{k-1} \omega^T(i)\omega(i) = \\ &= \sum_{i=0}^{k-1} (\Delta V(i) - \omega^T(i)\omega(i)). \end{aligned} \quad (25)$$

当 $\omega(k) \neq 0$ 时, 有

$$\Delta V(k) = e^T(k+1)Pe(k+1) +$$

$$(d_2 - d_1 + 1)e^T(k)Se(k) - e^T(k)Pe(k) - e^T(k - \tau(k))Se(k - \tau(k)). \quad (26)$$

考虑事件触发需要满足式(3),由于 $\sigma_i(k)$ 在 $[\sigma_m, \sigma_M]$ 内有界变化,当 $\sigma_i(k)$ 为 σ_M 时,事件触发频率最低,系统趋向于稳定.

$$\hat{J} = \sum_{i=0}^{k-1} (\Delta V(i) - \omega^T(i)\omega(i)) - \eta^T(k)\Phi_{r(k)}\eta(k) + \sigma_M g^T(k)\Phi_{r(k)}g(k). \quad (27)$$

由式(3)可知,如果 $\hat{J} < 0$ 成立,则 $J < 0$ 也一定成立.

由Schur补引理可知,式(27)与(15)是等价的,式(16)等价于 $\tilde{M}^T \tilde{M} < \gamma^2 P$. 因此 $\hat{J} < 0$ 即 $J < 0$,所以

$$V(k) - \sum_{i=0}^{k-1} \omega^T(i)\omega(i) < 0, \quad \eta^T(k)P\eta(k) < \sum_{i=0}^{k-1} \omega^T(i)\omega(i). \quad (28)$$

当 $k > 0$ 时,有

$$\begin{aligned} \tilde{z}^T(k)\tilde{z}(k) &= e^T(k)\tilde{M}^T \tilde{M}e(k) < \gamma^2 e^T(k)Pe(k) < \\ &\gamma^2 \sum_{i=0}^{k-1} \omega^T(i)\omega(i) \leq \gamma^2 \sum_{i=0}^{\infty} \omega^T(i)\omega(i), \end{aligned} \quad (29)$$

由式(28)可知

$$\sup_k \{\tilde{z}^T(k)\tilde{z}(k)\} < \gamma^2 \sum_{i=0}^{\infty} \omega^T(i)\omega(i), \quad (30)$$

即 $\|\tilde{z}(k)\|_{\infty}^2 < \gamma^2 \|\omega(k)\|_2^2$. \square

注3 滤波器定义性能函数 J 时需要考虑事件触发条件(3),故性能函数需要定义为式(27)的形式,以保证滤波器在事件触发情况下系统稳定.

3 l_2 - l_{∞} 滤波器设计

定理2 给定 $\gamma > 0$,由引理2可得,如果存在正定矩阵 P, S 和矩阵 G, V_1, V_2 使得下式成立:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\Gamma}_{11} & * & * & * & * \\ 0 & \tilde{\Gamma}_{22} & * & * & * \\ \tilde{\Gamma}_{31} & 0 & \tilde{\Gamma}_{33} & * & * \\ 0 & 0 & 0 & \tilde{\Gamma}_{44} & * \\ \tilde{\Gamma}_{51} & \tilde{\Gamma}_{52} & \tilde{\Gamma}_{53} & \tilde{\Gamma}_{54} & \tilde{\Gamma}_{55} \end{bmatrix} < 0, \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} -P & * \\ \tilde{M} & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0. \quad (32)$$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{\Gamma}_{11} &= \tilde{A}_1^T P \tilde{A}_1 + (d_2 - d_1 + 1)S + \\ &\sigma_M \tilde{W}^T \Phi_{r(k)} \tilde{W} - P, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\Gamma}_{22} &= -S, \quad \tilde{\Gamma}_{31} = -\sigma_M \tilde{W}^T \Phi_{r(k)} \tilde{W}, \\ \tilde{\Gamma}_{33} &= \sigma_M \tilde{W}^T \Phi_{r(k)} \tilde{W} - I, \quad \tilde{\Gamma}_{44} = -I, \\ \tilde{\Gamma}_{51} &= G\tilde{A} - G\tilde{L}\tilde{C} + G\tilde{K}\tilde{W}, \quad \tilde{\Gamma}_{52} = G\tilde{A}_d, \\ \tilde{\Gamma}_{53} &= -G\tilde{K}\tilde{W}, \quad \tilde{\Gamma}_{54} = G\tilde{B}, \quad \tilde{\Gamma}_{55} = P - G - G^T. \end{aligned}$$

则系统(9)是均方指数稳定并且具有给定的 l_2 - l_{∞} 性能.

证明 将式(8)下方定义的变量代入(15),并令 $G\tilde{L} = V_1, G\tilde{K} = V_2$,根据引理2定义的等价矩阵可得式(31)等价于(15). 则可取滤波器参数为 $\tilde{L} = G^{-1}V_1, \tilde{K} = G^{-1}V_2$. \square

注4 定理2给出了非高斯干扰输入下的分布式 l_2 - l_{∞} 滤波器的设计方法,传感器网络所有滤波器存在的充分条件转化为线性矩阵不等式(31)和(32)可行解问题,因此可通过求解如下的凸优化问题设计分布式 l_2 - l_{∞} 滤波器:

$$\begin{aligned} \min_{R, Q(s), X^s, Y^s} \quad & \delta; \\ \text{s.t.} \quad & \text{式(36)和(37)}. \end{aligned} \quad (33)$$

其中 $\delta = \gamma^2$.

4 数学仿真

本文研究了基于自适应事件触发的时滞系统分布式滤波问题,下面通过数据仿真验证算法的有效性.

假定分布式滤波器数量为4个,分布式滤波器的拓扑结构为

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

考虑离散系统参数如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.7 \\ 0.8 & -0.5 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.5 \end{bmatrix}, \quad A_d = \begin{bmatrix} 0.04 & 0.05 \\ 0.05 & -0.1 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = [0.3 \quad 0.9], \quad C_2 = [-0.4 \quad 0.7],$$

$$C_3 = [0.3 \quad 0.8], \quad C_4 = [-0.3 \quad 0.7], \quad M = [1 \quad 1].$$

选取时变时滞 $\tau(k)$ 的参数 $d_1 = 1, d_2 = 2$,自适应事件触发参数范围 $\sigma_m = 0.1, \sigma_M = 0.8$.

为了验证自适应事件触发相较于固定阈值事件触发能够动态调节事件触发阈值在保证滤波器性能前提下达到节约通信资源的效果,定义滤波系统估计误差 $\bar{e}(k) = \sum_{i=1}^4 \|\tilde{z}(k)\|^2$.

将事件触发阈值参数分别固定为0.2、0.5、0.8

并与自适应事件触发机制进行比较,利用 Matlab LMI Toolbox 工具箱对优化问题(33)进行寻优,得到最优 γ 分别为2.659、2.817、2.930、2.673. 滤波器节点传输数据次数(总时刻为60)如表1所示,滤波系统估计误差如图2所示.

表1 滤波器节点事件触发次数

$\sigma_i(k)$	0.2	0.5	0.8	自适应
滤波器节点1	51	45	7	31
滤波器节点2	45	32	8	22
滤波器节点3	53	42	10	33
滤波器节点4	53	43	9	35

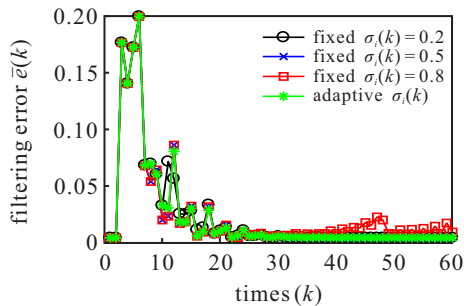


图2 滤波系统估计误差 $e(k)$

通过表1中数据可以看出,阈值参数接近下界时,触发次数已接近于周期性时间触发,阈值参数到达上界时,滤波器已基本不发送最新数据,如果不设置上下界,则阈值在到达上界后不断增大或到达下界后不断减小对事件触发敏感度不会产生影响,但此时仍会影响阈值 $\sigma_i(k)$ 调节的灵敏度,故本文设计的自适应触发机制将阈值 $\sigma_i(k)$ 设定在区间 $[\sigma_m, \sigma_M]$ 内有界变化.

图3为自适应事件触发机制下滤波器节点传输数据时刻;图4为系统实际输出 $z(k)$ 及自适应触发机制下各个滤波器节点估计值 $\hat{z}_i(k), i = 1, 2, 3, 4$.

仿真结果表明,同自适应事件触发机制下的滤波性能相比:阈值参数固定为0.2导致事件发送次数过多且并没有明显降低传感器的估计误差,造成网络通信资源浪费;阈值参数固定为0.8导致事件发送次数过少,影响滤波器性能;阈值参数固定为0.5时滤波性能接近自适应事件触发,但在系统稳定后也无法减少事件触发次数,一定程度上仍然存在网络资源的浪费. 所以固定阈值的事件触发机制在平衡系统稳定与节约通信资源上并不是最佳选择. 故采用自适应事件触发方案,相比较于固定阈值的事件触发,能够保证滤波性能较好的前提下动态调整事件触发参数,减少数据通信次数,进而降低网络通信资源的消耗.

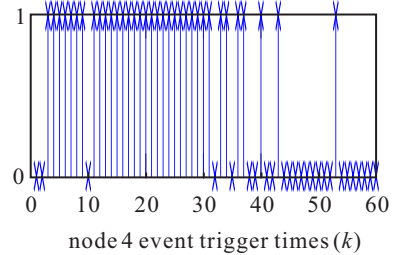
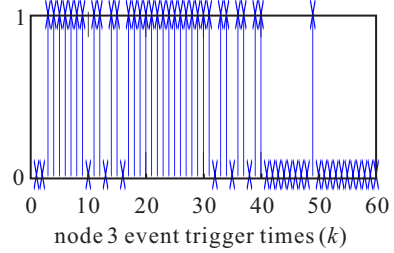
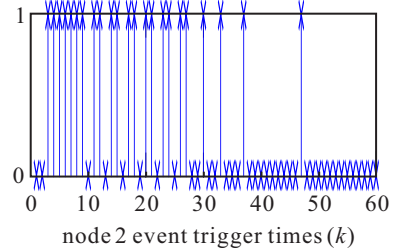
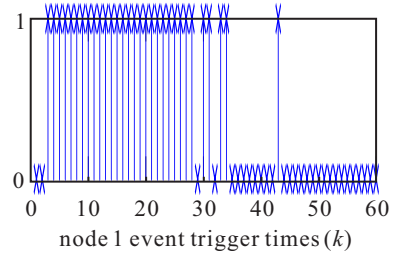


图3 自适应事件触发滤波器触发时刻

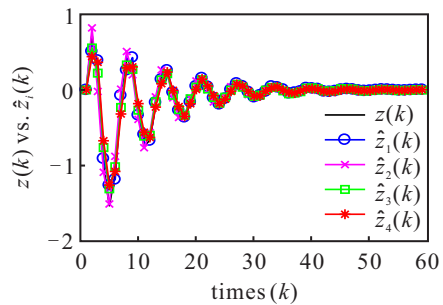


图4 实际输出 $z(k)$ 及各个节点输出估计值

5 结论

本文研究了系统存在时滞情况下,基于自适应事件触发的分布式 l_2-l_∞ 滤波器的设计问题,设计了离散系统自适应事件触发方案,根据滤波器对当前估计值与最新传输值之间的误差动态修改事件触发参数,使系统能够在保证滤波器性能前提下减少数据发送次数,节约网络资源. 在滤波器设计方面,利用李雅普诺夫稳定性理论和线性矩阵不等式方法,给出了分布式滤波器的满足 l_2-l_∞ 性能指标的判据和滤波器参数的设计方法,最后通过仿真验证了设计方法真实有

效. 但本文设计的滤波器是基于理想的网络环境, 进一步考虑遭受网络攻击和信道衰弱等影响因素将是后续需要克服的问题.

参考文献(References)

- [1] Yang X S, Zhang W A, Yu L, et al. Multi-rate distributed fusion estimation for sensor network-based target tracking[J]. IEEE Sensor Journal, 2016, 16(5): 1233-1242.
- [2] Yang F, Han Q L, Liu Y. Distributed H_∞ state estimation over a filtering network with time-varying and switching topology and partial information exchange[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(3): 870-882.
- [3] Alyazidi N M, Mahmoud M S. Distributed H_2/H_∞ filter design for discrete-time switched systems[J]. CAA Journal of Automatica Sinica, 2020, 7(1): 158-168.
- [4] Viegas D, Batista P, Oliveira P, et al. Discrete-time distributed Kalman filter design for formations of autonomous vehicles[J]. Control Engineering Practice, 2018, 75: 55-68.
- [5] Duan R R, Li J M. Distribute H_∞ filter design for T-S fuzzy systems with Sigma-Delta quantisation via non-PDC scheme[J]. International Journal of Systems Science, 2019, 50(4): 694-712.
- [6] Zhu B L, Suo M L, Zhang Z P, et al. L_2-L_∞ filtering for a class of stochastic nonlinear systems with aperiodic sampling[J]. Optimal Control Applications and Methods, 2018, 39(3): 1158-1167.
- [7] Yu Y B, Tang X L, Li T, et al. Mixed-delay-dependent l_2-l_∞ filtering for neutral stochastic systems with time-varying delays[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2019, 17(11): 2862-2870.
- [8] Zoulagh T, Boukili B, Hmamed A, et al. L_2-l_∞ reduced-order filtering for T-S fuzzy stochastic discrete systems[J]. International Journal of Systems Science, 2018, 49(10): 2061-2072.
- [9] Gu Z, Tian E G, Liu J L. Adaptive event-triggered control of a class of nonlinear networked systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(9): 3854-3871.
- [10] Gu Z, Yue D, Liu J L, et al. H_∞ tracking control of nonlinear networked systems with a novel adaptive event-triggered communication scheme[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017, 354(8): 3540-3553.
- [11] Wang Y Q, Zhang S Y, Dong X B, et al. Fault detection for a class of nonlinear networked systems under adaptive event-triggered scheme with randomly occurring nonlinear perturbations[J]. International Journal of Systems Science, 2018, 49(9): 1918-1933.
- [12] Yan H C, Yang Q, Zhang H, et al. Distributed H_∞ state estimation for a class of filtering networks with time-varying switching topologies and packet losses[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2018, 48(12): 2047-2057.
- [13] Yang R N, Shi P, Liu G P. Filtering for discrete-time networked nonlinear systems with mixed random delays and packet dropouts[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2011, 56(11): 2655-2660.
- [14] 李艳辉, 吴迪. 考虑随机时滞的非线性网控系统鲁棒 L_2-L_∞ 控制[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(7): 931-937.
(Li Y H, Wu D. Robust L_2-L_∞ control for nonlinear networked control systems with random time delays[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(7): 931-937.)
- [15] 熊卫华, 董瑞华, 吴之昊. 自适应事件触发的马尔科夫跳变多智能体系统一致性[J]. 控制与决策, 2020, 35(11): 2780-2786.
(Xiong W H, Dong R H, Wu Z H, et al. Adaptive event-triggered consensus for markovain jumping multi-agent systems[J]. Control and Decision, 2020, 35(11): 2780-2786.)
- [16] 董娜, 常建芳, 韩学烁, 等. 大时滞系统的无模型控制方法及应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(12): 1987-1993.
(Dong N, Chang J F, Han X S, et al. Model-free control method and its application for large time-delay systems[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(12): 1987-1993.)
- [17] 王武, 蔡逢煌, 林琼斌, 等. 部分测量数据丢失的网络化系统的 l_2-l_∞ 滤波[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6): 919-923.
(Wang W, Cai F H, Lin Q B, et al. l_2-l_∞ filtering for networked systems with missing measurements[J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(6): 919-923.)
- [18] Shen B, Wang Z D, Shu H. Distributed H_∞ consensus filtering in sensor networks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics — Part B, 2009, 39(6): 1568-1577.

作者简介

乔伟豪(1995—), 男, 硕士生, 从事无线传感网、分布式滤波的研究, E-mail: 15061886689@163.com;

朱凤增(1992—), 男, 博士生, 从事网络化动态系统状态估计、故障诊断、容错控制的研究, E-mail: zhufengzeng@stu.jiangnan.edu.cn;

彭力(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 从事复杂系统控制与优化、视觉物联网等研究, E-mail: pengli@jiangnan.edu.cn.

(责任编辑: 闫妍)