

受一类多通道异构网络通信约束的 网络系统 H_2/H_∞ 滤波研究

杜大军¹ 宋志华¹ 费敏锐¹ 王海宽¹

摘要 针对异构网络中不同类型网络及每个通道在不同时刻所产生的网络诱导延时和数据丢包不同,使得异构网络环境下 H_2/H_∞ 滤波更加困难的新问题,不同于目前广泛研究的单种类型网络环境下的 H_2/H_∞ 滤波方法,首先,深入分析了异构网络通信特性并给出了数学描述公式,然后,建立了融合多通道异构网络通信约束的滤波误差动态系统综合模型.基于 Lyapunov-Krasovskii 理论,证明了在已知有线网络和无线网络分别存在的最长网络诱导延时情况下,所设计的滤波器使得滤波误差动态系统随机稳定且满足给定的 H_2/H_∞ 性能指标.仿真验证该方法可行且有效.

关键词 异构网络,马尔科夫链, H_2/H_∞ 滤波,随机稳定

引用格式 杜大军,宋志华,费敏锐,王海宽.受一类多通道异构网络通信约束的网络系统 H_2/H_∞ 滤波研究.自动化学报,2014,40(11):2664–2672

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.02664

H_2/H_∞ Filtering for Networked Systems with a Kind of Multi-channel Hybrid Network Communication Constraints

DU Da-Jun¹ SONG Zhi-Hua¹ FEI Min-Rui¹
WANG Hai-Kuan¹

Abstract This paper investigates H_2/H_∞ filtering for complex multi-channel hybrid networked systems with different network delays and packet dropout in each channel. Unlike the widely existing H_2/H_∞ filtering methods under single network environment, where multiple signals are encapsulated into single packet and transmitted through one common channel. The characters of hybrid network are firstly analyzed, which are then described by analytical formulations. A comprehensive filtering error dynamic system model which contains multi-channel hybrid network communication constraints is then established. Based on the Lyapunov-Krasovskii theory, the designed filter enables the multi-channel error dynamic system to be stochastically stable and to guarantee a prescribed H_2/H_∞ performance, under the known maximum network delays of wired and wireless networks. Simulation confirms the efficiency of the proposed method.

Key words Hybrid network, Markov chain, H_2/H_∞ filtering, stochastic stability

Citation Du Da-Jun, Song Zhi-Hua, Fei Min-Rui, Wang Hai-Kuan. H_2/H_∞ filtering for networked systems with a kind of multi-channel hybrid network communication constraints. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(11): 2664–2672

收稿日期 2013-06-05 录用日期 2013-11-21

Manuscript received June 5, 2013; accepted November 21, 2013

国家自然科学基金(61074032, 61104089, 61473182),上海市青年科技启明星计划(13QA1401600),上海市科委项目(11ZR1413100, 11JC1404000)资助

Supported by National Natural Science Foundation of China (61074032, 61104089, 61473182), Shanghai Rising-Star Program (13QA1401600), and Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (11ZR1413100, 11JC1404000)

本文责任编辑 孙希明

通过网络传输测量信号和控制信号的网络控制系统 (Networked control systems, NCSs), 由于布线简单、便于安装和维护等诸多优点, 已逐步应用于冶金、电站和航天等领域^[1-3]. NCSs 主要基于有线网络 (如现场总线、工业以太网等) 构建而成, 但实际过程中大量的移动或旋转对象 (如轧钢生产线中活套辊的振动温度测量) 上还存在传感/执行器、数据采集设备等, 其通信是很难或不能用普通的有线网络实现, 或对易燃易爆等恶劣环境有线网络无法满足测量和控制的需求. 因此, 无线网络与有线网络相互融合的异构网络系统 (Hybrid networked systems, HNSs) 是解决此类问题的必然途径. 目前在物联网、智能电网和智能工厂中出现越来越多的 HNSs^[4-5], 已经引起广大科研工作者和实际工程技术人员关注, 如 Siemens 公司和 Phoenix 公司联合推出了基于 802.11 技术的“无线工厂”, 对 Profibus 总线进行了无线的点对点的扩展; Honeywell 公司推出了“工业无线路标”, 该网络支持多种工业通讯协议及各种设备与其他无线装置的信息互通; 国内自动化厂商也推出了基于 EPA (Ethernet for plant automation) 工业以太网的 WLAN、Zigbee、蓝牙等扩展产品.

由于行业及应用现场的技术特点不同, 有线网络 (如国际电工委员会公布了三十余种现场总线和工业以太网标准)、无线网络之间形成了互不兼容、竞争共存、高速发展的局面. 目前网关 (协议转换器) 是实现异构网络之间高速实时数据传输的一种主要模式, 但在 HNSs 中, 多个无线传感/执行器节点经过网关与有线网络互联, 信号通过多通道进行通信, 导致多通道异构网络除了具有单通道单种类型 (有线或无线) 网络特性外, 还具有以下新特征:

- 1) 不同类型网络的带宽和协议等不同;
- 2) 信号在不同网络中产生的网络性能参量 (网络延时、数据丢包等) 不同;
- 3) 不同网络在不同时刻存在的网络性能参量不尽相同;

这使得网络与系统的相互影响更加复杂, 给异构网络系统带来许多新问题和新的挑战.

在网络系统中通常存在噪声干扰, 这必将限制和降低系统性能, 故必须采用滤波技术来降低或消除噪声干扰^[6]. 针对 Guass 噪声, 经典的 Kalman 滤波器根据最小均方误差最佳的准则, 能够进行最优滤波估计. 如文献 [7-8] 分别解决了具有多丢包、数据丢失情况下的离散不确定系统鲁棒 Kalman 滤波问题. 当系统的噪声为非 Guass 情况时, Elsayed 把扰动看作是能量有界的信号引入了 H_∞ 滤波, 主要是最小化滤波误差系统的 H_∞ 范数的上界, 解决了鲁棒 Kalman 滤波方法对噪声输入信号的限制^[9-10]. 进一步, 国内外学者基于 Wilson 提出的 H_2/H_∞ 性能准则, 设计滤波器使得滤波误差系统具有一定的 H_2/H_∞ 扰动衰减水平, 即能量-峰值滤波.

目前, 国内外学者主要考虑单通道单种类型网络性能参量开展 H_2 、 H_∞ 滤波研究, 并取得一些成果. 如: 文献 [11] 考虑网络诱导延时和数据丢包, 证明了 H_∞ 滤波器存在并使得系统渐近稳定的充分条件. 文献 [12] 考虑多步网络诱导延时

和数据丢包, 采用 Bernoulli 分布描述网络不确定性因素, 设计了线性全阶滤波器并给出了系统指数稳定的充分条件. 文献 [13] 采用 Bernoulli 分布描述网络诱导延时, 证明了系统均方指数稳定且具有给定的 H_∞ 性能. 文献 [14] 研究了具有进一步延时和丢包的 H_∞ 滤波器设计, 并证明了系统均方指数稳定. 然而, 在实际应用中, 有时传感器分布于不同的地域, 信号通过多通道和滤波器进行通信, 使得网络不确定性因素异常复杂, 故必须分析多通道通信约束对滤波器性能的影响.

针对多通道网络通信约束, 网络系统 H_2/H_∞ 滤波问题逐渐吸引研究人员的兴趣. 文献 [15] 针对每个网络通道的数据丢包, 采用一个二态的马尔科夫链进行描述, 但只给出了一个基于 2 通道的滤波误差系统满足均方指数稳定的充分条件. 文献 [16] 采用 Bernoulli 分布描述每个通道的传感器故障, 进一步采用缓冲区策略来处理网络诱导延时, 给出了 H_∞ 滤波器时滞依赖和参数依赖的充分条件. 以上工作主要考虑部分网络性能参量进行 H_2/H_∞ 滤波研究, 故带有多通道数据丢包的 H_2/H_∞ 滤波问题还有待深入研究.

无线网络与有线网络相互融合的异构网络逐渐引起研究人员的关注. 文献 [17-19] 研究了有线网络和无线网络的集成方法和实时性能. 文献 [20] 考虑异构网络中有线网络的性能参量, 研究了异构网络环境下的机器人遥控操作方法. 以上工作主要探索异构网络的集成方法、网络性能以及考虑部分网络性能参量开展异构网络控制系统研究, 然而多通道异构网络中不同类型网络以及不同时刻的网络性能参量各异, 并且无线网络受工业环境的影响使得测量数据含有大量噪声, 因此, 必须考虑多通道异构网络通信约束进行深入研究网络化系统 H_2/H_∞ 滤波.

本文研究了受复杂多通道异构网络通信约束的网络化系统 H_2/H_∞ 滤波器设计问题, 主要理论贡献包括: 1) 针对目前一种工业异构网络系统架构, 深入分析了多通道异构网络的通信特性, 并采用数学公式刻画了不同网络的性能参量; 2) 建立了融合多通道异构网络通信约束的滤波误差动态系统综合模型, 证明了在已知有线网络和无线网络分别存在的最长网络诱导延时情况下, 所设计的滤波器使得滤波误差动态系统随机稳定且满足给定的 H_2/H_∞ 性能指标.

1 问题描述

考虑如下带有噪声干扰的离散系统:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bw(k) \\ y(k) = Cx(k) \\ z(k) = Lx(k) \end{cases} \quad (1)$$

式中, A 、 B 、 C 、 D 和 L 为已知的适当维数常数矩阵, $x(k) = [x_1(k), \dots, x_m(k)]^T \in \mathbf{R}^m$ 为系统的状态, $y(k) = [y_1(k), \dots, y_n(k)]^T \in \mathbf{R}^n$ 为系统的测量输出, $z(k) = [z_1(k), \dots, z_g(k)]^T \in \mathbf{R}^g$ 为系统的被调输出, $w(k) = [w_1(k), \dots, w_q(k)]^T \in \mathbf{R}^q$ 为系统中能量有界的干扰信号, 即 $w(k)$ 属于 $l_2[0, \infty)$.

带有多通道异构网络通信约束的网络化系统的 H_2/H_∞ 滤波如图 1 所示, 是目前一种工业多层网络系统架构方式, 如 Simens 公司的 Simatic PCS 7 和 Emerson 公司的 DeltaV 等. 在图 1 中, 在每个采样时刻如在第 k 个采样时刻, n 个传感器的测量信号 ($y_1(k), \dots, y_p(k), \dots, y_n(k)$) 分别通过无线网络中的 n 个独立物理通道传送到网关 (协议转换器)^[18], 然后, 在网关进行协议转换, 将其转换成对应的有线网络数

Recommended by Associate Editor SUN Xi-Ming

1. 上海大学机电工程与自动化学院上海市电站自动化技术重点实验室 上海 200072

1. Shanghai Key Laboratory of Power Station Automation Technology, School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072

据格式, 即将 $y_1(k), \dots, y_p(k), \dots, y_n(k)$ 分别转换成对应的 $\hat{y}_1(k), \dots, \hat{y}_p(k), \dots, \hat{y}_n(k)$, 然后, 通过有线网络将信号传送到滤波器, 在有线网络中 $\hat{y}_1(k), \dots, \hat{y}_p(k), \dots, \hat{y}_n(k)$ 分别进行单独传输, 类似于 n 个虚拟通道进行传输. 传感器和滤波器均采用时间驱动且采样周期均为 T .

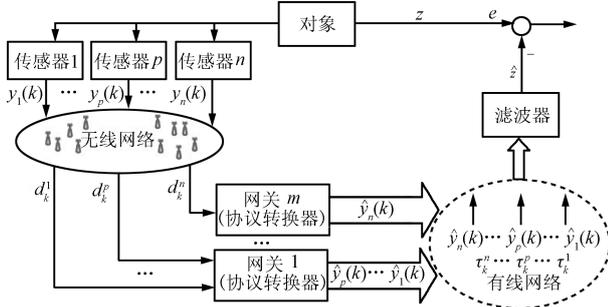


图1 受多通道异构网络通信约束的网络化系统 H_2/H_∞ 滤波示意图
Fig.1 H_2/H_∞ filtering for networked systems with multi-channel hybrid networked communication constraints

注1. 网关将 $y_1(k), \dots, y_p(k), \dots, y_n(k)$ 分别转换成对应的 $\hat{y}_1(k), \dots, \hat{y}_p(k), \dots, \hat{y}_n(k)$ 后, 若把部分数据进行重新打包, 如将 $\hat{y}_1(k), \dots, \hat{y}_m(k)$ 打成一个包, 然后, 通过有线网络传送到滤波器, 则这些数据在有线网络中传输具有相同的网络延时和数据丢包特性.

注2. 在实际系统中, 不同的传感器由于分布于不同的地域, 将通过不同的网关进行协议转换, 网关主要根据传感器的位置以及实际需求来进行部署, 如图1中传感器1到传感器 p 通过网关1进行数据转换, 然后, 将转换后的数据 $\hat{y}_1(k), \dots, \hat{y}_p(k)$ 通过有线网络分别传送到滤波器. 在特殊情况下, n 个传感器通过 n 个网关进行协议转换.

注3. 信号通过无线网络、网关以及有线网络传送到滤波器, 由于无线网络和有线网络的带宽和协议不同, 导致不同网段中的网络诱导延时和数据丢包不同.

在图1中, 信号在无线和有线网络的每个通道中传输都会产生网络诱导延时和数据丢包, 根据文献[21]思想可将数据丢包看作具有最大的网络诱导延时, 故把网络诱导延时和数据丢包统一为网络诱导延时来考虑. 因此, n 个传感器通过无线网络将信号传送到网关, 在每个通道都会产生网络诱导延时 $d_k^1, \dots, d_k^p, \dots, d_k^n$, 然后, 信号通过有线网络传送到滤波器也会产生网络诱导延时 $\tau_k^1, \dots, \tau_k^p, \dots, \tau_k^n$. 由于有线网络为一条物理通道, 在同一时刻, n 个虚拟通道的网络诱导延时特性相同, 即 $\tau_k^1 = \dots = \tau_k^p = \dots = \tau_k^n$, 但在不同时刻, 网络诱导延时特性不尽相同, 即 $\tau_k^p = \tau_{k+1}^p$ 或 $\tau_k^p \neq \tau_{k+1}^p, p = 1, \dots, n$. 然而, 无线网络中的 n 个通道在同一时刻网络诱导延时既可能相同也可能不同. 因此, 根据无线网络每个通道在同一时刻的网络诱导延时特性, 系统的网络诱导特性可分为两类:

- 1) n 个无线通道的网络诱导延时相同, n 个有线通道的网络诱导延时相同, 即 $d_k^1 = \dots = d_k^p = \dots = d_k^n, \tau_k^1 = \dots = \tau_k^p = \dots = \tau_k^n, p = 1, \dots, n$;
- 2) n 个无线通道的网络诱导延时不尽相同, n 个有线通道的网络诱导延时相同, 即 $d_k^p = d_k^{p'} \text{ 或 } d_k^p \neq d_k^{p'}, p, p' \in \{1, \dots, n\}, \tau_k^1 = \dots = \tau_k^p = \dots = \tau_k^n, p = 1, \dots, n$.

本文针对第1)种情况开展深入研究, 即考虑 n 个无线和有线通道在同一时刻的网络诱导延时相同, 但在不同时刻的网络诱导延时不尽相同. 设无线网络中每个通道的网络诱

导延时 $d_k = [d_k^1, \dots, d_k^p, \dots, d_k^n]^T$ 满足: $0 \leq d_k^p \leq d < \infty, p = 1, \dots, n, d$ 为正整数. 同理, 设有线网络中每个通道的网络诱导延时 $\tau_k = [\tau_k^1, \dots, \tau_k^p, \dots, \tau_k^n]^T$ 满足: $0 \leq \tau_k^p \leq \tau < \infty, p = 1, \dots, n, \tau$ 为正整数. 由于网关进行协议转换较快, 产生的延时可以忽略.

由于无线和有线不同网段每个通道中的网络诱导延时和数据丢包等网络不确定性因素特性不同. 本文采用两个马尔科夫链分别描述无线网络和有线网络中的网络诱导延时 d_k 和 τ_k 特性, 并且每个时刻 d_k 和 τ_k 中的每个元素都分别在集合 $N = \{0, 1, \dots, d\}$ 和 $M = \{0, 1, \dots, \tau\}$ 中, 即 $d_k^p \in N$ 和 $\tau_k^p \in M$, 它们的概率转移矩阵分别表示为 $\Pi \in [\pi_{rs}]$, $\Lambda \in [\lambda_{ij}]$. 例如: 对于第 p 个通道的无线和有线网络中的网络诱导延时 d_k^p 和 τ_k^p 分别从 k 时刻的 r_p 状态和 i_p 状态跳变到 $k+1$ 时刻的 s_p 状态和 j_p 状态, 跳变概率为

$$\begin{cases} \pi_{r_p s_p}^p = \Pr(d_{k+1}^p = s_p | d_k^p = r_p) \\ \lambda_{i_p j_p}^p = \Pr(\tau_{k+1}^p = j_p | \tau_k^p = i_p) \end{cases} \quad (2)$$

式中, $p = 1, \dots, n$, 对于所有的 $i_p, j_p \in M$ 和 $r_p, s_p \in N$, 有 $\lambda_{i_p j_p}^p, \pi_{r_p s_p}^p \geq 0$, 且 $\sum_{j_p=0}^{\tau} \lambda_{i_p j_p}^p = 1, \sum_{s_p=0}^d \pi_{r_p s_p}^p = 1$.

注4. 采用马尔科夫状态转移矩阵 Π 和 Λ 分别刻画无线网络和有线网络中每个通道的网络诱导延时特性, 由于在同一时刻每个通道的状态相同, 故其跳变概率也相同.

注5. 针对无线和有线网络, 可以采用网络分析工具(如无线网络 Airo Peek 和以太网 Ethereal 等)捕获数据包, 然后, 根据数据包的类型标识、序号和时间戳等标记以及有效数据载荷等分析数据包是否正常、延时或丢失, 进一步运用统计分析方法建立马尔科夫模型^[22-23].

在各个时刻, 滤波器都采用每一个通道的最新数据包, 即如果在 k 时刻, 若第 p ($p = 1, \dots, n$) 个通道采用数据包 $x(k - \tau_k^p)$, 而在 $k+1$ 时刻, 出现了延时大于一个采样周期或数据丢包, 则 $k+1$ 时刻仍采用 k 时刻的数据包 $x(k - \tau_k^p)$, 这表示在每一采样时刻, 网络诱导延时 τ_k^p 最大只能增加1, 即 $\Pr(\tau_{k+1}^p > \tau_k^p + 1) = 0$, 从式(2)可得:

$$\begin{cases} \pi_{r_p s_p}^p = 0, & s_p > r_p + 1 \\ \lambda_{i_p j_p}^p = 0, & j_p > i_p + 1 \end{cases} \quad (3)$$

在图1中, 信号通过无线网络和有线网络传输到滤波器, 故传感器到滤波器之间的网络诱导延时由无线网络和有线网络中的网络诱导延时构成, 然而信号在有线网络中的网络诱导延时信息受到前面无线网段诱导延时的影响. 例如: 在采样时刻 k , 对于第 p ($p = 1, \dots, n$) 个通道, 信号从网关通过有线网络诱导延时 τ_k^p 到达滤波器端, 也表明网关在 $k - \tau_k^p$ 时刻接收到该信号, 则该信号在无线网络中的网络诱导延时对应为 $d_{k - \tau_k^p}^p$ (即为 $k - \tau_k^p$ 时刻无线网络中网络诱导延时), 如图2所示. 因此, 滤波器所接收到的无线网络诱导延时由 k 时刻的 $d_{k - \tau_k}^p = r_p$ 跳变到 $k+1$ 时刻的 $d_{k+1 - \tau_{k+1}}^p = s_p$; 而对于有线网络, 从 k 时刻到 $k+1$ 时刻, 网络诱导延时由 $\tau_k^p = i_p$ 跳变到 $\tau_{k+1}^p = j_p$.

因此, 对于所有 n 个传感器通过 n 个通道传信号到达滤波器, 则经过的无线网络诱导延时为 $d_{k - \tau_k} = [d_{k - \tau_k}^1, \dots, d_{k - \tau_k}^p, \dots, d_{k - \tau_k}^n]^T$, 有线网络诱导延时为 $\tau_k = [\tau_k^1, \dots, \tau_k^p, \dots, \tau_k^n]^T$, 并且 $d_{k - \tau_k}$ 中的每个元素都相同, τ_k 中的每个元素也都相同.

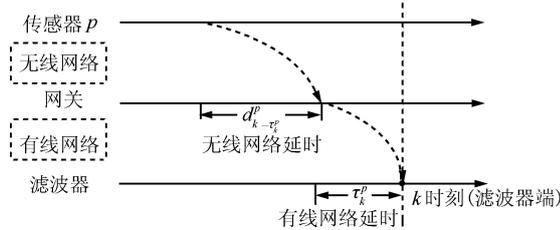


图 2 k 时刻信号在无线网络和有线网络的时序图

Fig. 2 Timing diagram of signal through wireless network and wire network at k th instant

注 6. 如果从 d_{k-1}^p 跳变到 d_k^p 的转移概率矩阵为 Π , 则从 $d_{k-\tau_{k+1}}^p$ 跳变到 d_k^p 的转移概率矩阵为 $\Pi^{\tau_{k+1}}$, 且它仍是马尔科夫链的一个转移概率矩阵^[24]. 特殊情况下, 若 $\tau_{k+1}^p = 0$, 那么转移概率矩阵 $\Pi^{\tau_{k+1}} = \Pi^0 = I$.

由于测量数据经过无线网络到达网关, 然后, 再经过有线网络到达滤波器, 故设计的滤波器同时依赖有线和无线网络诱导延时 τ_k 和 $d_{k-\tau_k}$. 如: 对第 p 个通道, 滤波器所接受的对应信号 $\hat{y}_p(k)$ 为

$$\hat{y}_p(k) = y_p(k - \tau_k^p - d_{k-\tau_k}^p) \quad (4)$$

式中, $p = 1, 2, \dots, n$. 采用文献 [21] 考虑输出外部干扰的方法, 对所有通道, 滤波器接受的对应信息 $\hat{y}(k)$ 为

$$\hat{y}(k) = y(k - \tau_k - d_{k-\tau_k}) = Cx(k - \tau_k - d_{k-\tau_k}) + Dw(k) \quad (5)$$

由于 $\tau_k + d_{k-\tau_k} \in \{1, \dots, \tau + d\}$, 则上式可化为

$$\begin{aligned} \hat{y}(k) &= \sigma_{\tau_k, d_{k-\tau_k}} Cx(k) + \\ &(I - \sigma_{\tau_k, d_{k-\tau_k}})Cx(k - \tau_k - d_{k-\tau_k}) + Dw(k) = \\ &\sigma_{\tau_k, d_{k-\tau_k}} Cx(k) + (I - \sigma_{\tau_k, d_{k-\tau_k}})\bar{C}\bar{X}(k) + Dw(k) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $\sigma_{\tau_k, d_{k-\tau_k}}$ 为 \mathbf{I} (即不存在网络诱导延时) 或 $\mathbf{0}$ (即存在网络诱导延时); $\bar{X}(k) = [x^T(k-1), x^T(k-2), \dots, x^T(k-\tau-d)]^T$, $\bar{C} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & C & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{\tau+d}$, 其中, 状态 $x(k-\tau_k-d_{k-\tau_k})$

对应的元素为矩阵 C , 其他均为 $\mathbf{0}$ 矩阵.

根据以上定义的 $\bar{X}(k)$, 可得:

$$\bar{X}(k+1) = A_1 x(k) + A_2 \bar{X}(k) \quad (7)$$

式中

$$A_1 = \begin{bmatrix} I_{m \times m} \\ 0_{m \times m} \\ \vdots \\ 0_{m \times m} \end{bmatrix}_{((\tau+d)m) \times m}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0_{m \times m} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ I_{m \times m} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & I_{m \times m} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & I_{m \times m} & 0_{m \times m} \end{bmatrix}$$

设计如下模式依赖全阶滤波器:

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = A_f(\tau_k, d_{k-\tau_k})\hat{x}(k) + \\ \quad B_f(\tau_k, d_{k-\tau_k})\hat{y}(k) \\ \hat{z}(k) = C_f(\tau_k, d_{k-\tau_k})\hat{x}(k) \end{cases} \quad (8)$$

式中, $\hat{x}(k) \in \mathbf{R}^m$ 为滤波器状态, $\hat{z}(k) \in \mathbf{R}^g$ 为 $z(k)$ 的估计值, $A_f(\tau_k, d_{k-\tau_k})$ 、 $B_f(\tau_k, d_{k-\tau_k})$ 、 $C_f(\tau_k, d_{k-\tau_k})$ 为滤波器的参数.

为了描述方便, 下文将 τ_k 、 τ_{k+1} 、 $d_{k-\tau_k}$ 和 $d_{k+1-\tau_{k+1}}$ 记为: $\tau_k = i$, $\tau_{k+1} = j$, $d_{k-\tau_k} = r$, $d_{k+1-\tau_{k+1}} = s$. 定义 $\xi^T(k) = [x^T(k) \quad \hat{x}^T(k) \quad \bar{X}^T(k)]^T$, 误差 $e(k) = z(k) - \hat{z}(k)$. 由式 (1)、(6)~(8) 可得到滤波误差系统:

$$\begin{cases} \xi(k+1) = \tilde{A}(i, r)\xi(k) + \tilde{B}(i, r)w(k) \\ e(k) = \tilde{C}(i, r)\xi(k) \end{cases} \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} \tilde{A}(i, r) &= \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ B_f(i, r)\sigma_{i, r}C & A_f(i, r) & B_f(i, r)(I - \sigma_{i, r})\bar{C} \\ A_1 & 0 & A_2 \end{bmatrix} \\ \tilde{B}(i, r) &= \begin{bmatrix} B \\ B_f(i, r)D \\ 0 \end{bmatrix} \\ \tilde{C}(i, r) &= [L \quad -C_f(i, r) \quad 0] \end{aligned}$$

注 7. 针对无线网络和有线网络特性, 采用两个马尔科夫链来分别进行描述, 然后, 建立了融合多通道异构网络通信约束的滤波误差动态系统综合模型 (9). 与目前普遍考虑单通道单种类型网络建立的滤波误差动态系统相比, 模型 (9) 更加复杂, 更具有普适性.

本文研究的带有多通道异构网络通信约束的网络化系统 H_2/H_∞ 滤波问题是:

1) 在外部干扰 $w(k) = 0$ 的情况下, 滤波误差动态系统是随机稳定, 如果对任意初始状态 (ϕ_0, s_0) , 存在:

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^l E(x^T(k)x(k)) < \infty \quad (10)$$

2) 在零初始条件下, 滤波误差动态系统满足 H_2/H_∞ 性能 γ ($\gamma > 0$), 即:

$$E(\|e(k)\|_\infty^2) < \gamma^2 E(\|w(k)\|_2^2), \quad \forall w(k) \neq 0 \quad (11)$$

式中

$$\|e(k)\|_{\infty}^2 = \sup_k \{e^T(k)e(k)\}$$

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

2 主要结果

定理 1. 在已知有线网络和无线网络分别存在最长网络诱导延时 τ 和 d 的情况下, 对于给定的 $\gamma > 0$, 如果存在正定对称矩阵 $P(i, r)$ 和 $P(j, s)$, 使得如下矩阵不等式组成立:

$$\begin{bmatrix} -P(i, r) + \chi_{11} & \chi_{12} \\ * & \chi_{22} - I \end{bmatrix} < 0 \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} -P(i, r) & \tilde{C}^T(i, r) \\ * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (13)$$

式中, $\chi_{11} = \sum_{j=0}^{\tau} \sum_{s=0}^d (\lambda_{i,j} \Pi_{r,s}^{1+i-j} \tilde{A}^T(i, r) P(j, s) \tilde{A}(i, r))$,
 $\chi_{12} = \sum_{j=0}^{\tau} \sum_{s=0}^d (\lambda_{i,j} \Pi_{r,s}^{1+i-j} \tilde{A}^T(i, r) P(j, s) \tilde{B}(i, r))$,
 $\chi_{22} = \sum_{j=0}^{\tau} \sum_{s=0}^d (\lambda_{i,j} \Pi_{r,s}^{1+i-j} \tilde{B}^T(i, r) P(j, s) \tilde{B}(i, r))$, “*” 表示矩阵中的对称项, 则滤波误差动态系统随机稳定且满足 H_2/H_{∞} 性能 γ .

证明. 选取一个 Lyapunov 函数, $V(\xi(k), k) = \xi^T(k)P(i, r)\xi(k)$,

1) 令 $w(k) = 0$, 分析滤波误差动态系统的稳定性.

$$\Delta V(k) = E(V(\xi(k+1), k+1)) - V(\xi(k), k) =$$

$$\sum_{j=0}^{\tau} \sum_{s=0}^d (\lambda_{i,j} \Pi_{r,s}^{1+i-j} \xi^T(k) \tilde{A}^T(i, r) \times$$

$$P(j, s) \tilde{A}(i, r) \xi(k)) - \xi^T(k) P(i, r) \xi(k) =$$

$$\xi^T(k) \Theta(i, r) \xi(k)$$

式中

$\Theta(i, r) =$

$$-P(i, r) + \sum_{j=0}^{\tau} \sum_{s=0}^d (\lambda_{i,j} \Pi_{r,s}^{1+i-j} \tilde{A}^T(i, r) P(j, s) \tilde{A}(i, r))$$

令 $\Theta(i, r) < 0$, 可得:

$$E(V(\xi(k+1), k+1)) - V(\xi(k), k) =$$

$$\xi^T(k) \Theta(i, r) \xi(k) \leq$$

$$-\beta \xi^T(k) \xi(k) \leq$$

$$-\beta x^T(k) x(k)$$

式中, $\beta = \inf \{\lambda_{\min}(-\Theta(i, r))\}$.

将上面不等式两边从 0 到 l ($l \rightarrow \infty$) 进行叠加, 则:

$$\lim_{l \rightarrow \infty} E(V(\xi(l+1), l+1)) - V(\phi_0, s_0) \leq$$

$$-\beta \lim_{l \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^l E(x^T(k)x(k))$$

进一步变换可得:

$$\lim_{l \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^l E(x^T(k)x(k)) \leq \frac{1}{\beta} (V(\phi_0, s_0) -$$

$$\lim_{l \rightarrow \infty} E(V(\xi(l+1), l+1))) \leq$$

$$\frac{1}{\beta} V(\phi_0, s_0) < \infty$$

故滤波误差动态系统随机稳定.

2) 令 $w(k) \neq 0$, 初始条件为零时, 分析滤波误差动态系统的 H_2/H_{∞} 性能

$$\Delta V = E(V(\xi(k+1), k+1)) - V(\xi(k), k) =$$

$$\sum_{j=0}^{\tau} \sum_{s=0}^d (\lambda_{i,j} \Pi_{r,s}^{1+i-j} (\tilde{A}(i, r) \xi(k) +$$

$$\tilde{B}(i, r) w(k))^T \times P(j, s) \times$$

$$(\tilde{A}(i, r) \xi(k) + \tilde{B}(i, r) w(k))) -$$

$$\xi^T(k) P(i, r) \xi(k) =$$

$$\mu^T(k) \begin{bmatrix} \chi_{11} - P(i, r) & \chi_{12} \\ \chi_{21} & \chi_{22} \end{bmatrix} \mu(k)$$

式中, $\mu(k) = \begin{bmatrix} \xi^T(k) & w^T(k) \end{bmatrix}^T$.

定义 $J = E(V(\xi(k), k)) - E\left(\sum_{h=0}^{k-1} w^T(h)w(h)\right)$, 当初始条件为零时, $E(V(\xi(0), 0))$ 的值也为零, 则:

$$J = E(V(\xi(k), k)) - E(V(\xi(0), 0)) -$$

$$E\left(\sum_{h=0}^{k-1} w^T(h)w(h)\right) =$$

$$\sum_{h=0}^{k-1} (\Delta V(\xi(h), h) - w^T(h)w(h)) =$$

$$\sum_{h=0}^{k-1} \mu^T(k) \Psi_1 \mu(k)$$

式中

$$\Psi_1 = \begin{bmatrix} -P(i, r) + \chi_{11} & \chi_{12} \\ \chi_{21} & \chi_{22} - I \end{bmatrix}$$

由 Schur 补, 式 (12) 成立, 则有 $J < 0$, 即:

$$E(\xi^T(k)P(i, r)\xi(k)) < E\left(\sum_{h=0}^{k-1} w^T(h)w(h)\right).$$

而由 Schur 补可知, 式 (13) 等价于

$$\tilde{C}^T(i, r) \tilde{C}(i, r) < \gamma^2 P(i, r)$$

则

$$E(\xi^T(k) \tilde{C}^T(i, r) \tilde{C}(i, r) \xi(k)) <$$

$$\gamma^2 E(\xi^T(k) P(i, r) \xi(k))$$

故

$$E(e^T(k)e(k)) < \gamma^2 E\left(\sum_{h=0}^{\infty} w^T(h)w(h)\right)$$

显然, 可得:

$$\sup_k \left\{ E(e^T(k)e(k)) \right\} < \gamma^2 E\left(\sum_{h=0}^{k-1} w^T(h)w(h)\right)$$

故系统随机稳定, 且满足 H_2/H_∞ 性能 γ .

3 多通道异构网络系统的 H_2/H_∞ 滤波器设计

引理 1^[15]. 对于矩阵 U , 对称矩阵 U_1, U_2 , 且 $U_1 > 0$, 若不等式 $U^T U_1 U - U_2 < 0$, 则存在矩阵 Y , 使得矩阵不等式

$$\begin{bmatrix} -U_2 & U^T Y \\ Y^T U & U_1 - Y - Y^T \end{bmatrix} < 0 \quad (14)$$

成立.

定理 2. 在已知有线网络和无线网络分别存在最长网络诱导延时 τ 和 d 的情况下, 对于给定的 $\gamma > 0$, 若存在正定对称矩阵 $P(i, r)$ 和 $P(j, s)$, 矩阵 $\bar{y}_{1m'}, \bar{y}_{2i'}, \bar{y}_{3m'}, m' = 1, 2, 3, i' = 1, 2, H(i, r), O(i, r), C_f(i, r)$, 使如下矩阵不等式组成立

$$\begin{bmatrix} -P(i, r) & 0 & \Xi_1 \Gamma \\ * & -I & \Xi_2 \Gamma \\ * & * & \Xi_3 \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} -P(i, r) & \tilde{C}^T(i, r) \\ * & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

式中, $P(i, r) = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} \end{bmatrix}$ ($p_{m'n'}$ 是块矩阵, $m' = 1, 2, 3, n' = 1, 2, 3$),

$$Y = \text{diag}\{\underbrace{\bar{Y}, \bar{Y}, \dots, \bar{Y}}_{\tau \times d}\}$$

$$\bar{Y} = \begin{bmatrix} \bar{y}_{11} & \bar{y}_{12} & \bar{y}_{13} \\ \bar{y}_{22} & \bar{y}_{22} & 0 \\ \bar{y}_{31} & \bar{y}_{32} & \bar{y}_{33} \end{bmatrix}$$

$$\Xi_1 = \begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \phi_{13} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & 0 \\ \phi_{31} & \phi_{32} & \phi_{33} \end{bmatrix}$$

$$\phi_{1i'} = A^T \bar{y}_{1i'} + C^T \sigma_{i,r}^T H^T(i, r) + A_1^T \bar{y}_{3i'}$$

$$\phi_{13} = A^T \bar{y}_{13} + A_1^T \bar{y}_{33}$$

$$\phi_{21'} = O^T(i, r)$$

$$\phi_{3i'} = \bar{C}^T (I - \sigma_{i,r})^T H^T(i, r) + A_2^T \bar{y}_{3i'}, \quad \phi_{33} = A_2^T \bar{y}_{33}$$

$$\Xi_2 = \begin{bmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \theta_{13} \end{bmatrix}$$

$$\theta_{1i'} = B^T \bar{y}_{1i'} + D^T H^T(i, r), \quad i' = 1, 2$$

$$\theta_{13} = B^T \bar{y}_{13}$$

$$\Xi_3 = \Omega - Y - Y^T$$

$$\Omega = \text{diag}\{\lambda_{i,0} \Pi_{r,0}^{1+i-0} P(0, 0), \lambda_{i,0} \Pi_{r,1}^{1+i-0} P(0, 1), \dots,$$

$$\lambda_{i,0} \Pi_{r,d}^{1+i-0} P(0, d), \lambda_{i,1} \Pi_{r,0}^{1+i-1} P(1, 0),$$

$$\lambda_{i,1} \Pi_{r,1}^{1+i-1} P(1, 1), \dots, \lambda_{i,1} \Pi_{r,d}^{1+i-1} P(1, d), \dots,$$

$$\lambda_{i,\tau} \Pi_{r,0}^{1+i-\tau} P(\tau, 0), \lambda_{i,\tau} \Pi_{r,1}^{1+i-\tau} P(\tau, 1), \dots,$$

$$\lambda_{i,\tau} \Pi_{r,d}^{1+i-\tau} P(\tau, d)\}$$

$$\Gamma = [\bar{I}, \bar{I}, \dots, \bar{I}]$$

$$\bar{I} = \text{diag}\{I, I, I\}$$

则滤波误差动态系统随机稳定, 且满足 H_2/H_∞ 性能 γ , 并且滤波器的参数为

$$A_f(i, r) = \left(\bar{y}_{22}^T\right)^{-1} O(i, r)$$

$$B_f(i, r) = \left(\bar{y}_{22}^T\right)^{-1} H(i, r)$$

证明. 根据引理 1, 定理 1 中不等式 (12) 可等效为

$$\begin{bmatrix} -P(i, r) & 0 & \tilde{A}^T(i, r) \Psi_2 Y \\ * & -I & \tilde{B}^T(i, r) \Psi_2 Y \\ * & * & \Omega - Y - Y^T \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

式中, $\Psi_2 = \underbrace{[I \quad I \quad \dots \quad I]}_{\tau \times d}$.

把 $\tilde{A}(i, r)$ 和 $\tilde{B}(i, r)$ 代入上式 (17), 再令 $H^T(i, r) = B_f^T(i, r) \bar{y}_{22}$, $O^T(i, r) = A_f^T(i, r) \bar{y}_{22}$ 可得到不等式 (15).

注 8. 定理 2 给出了在多通道异构网络通信约束下, 系统的 H_2/H_∞ 滤波器参数可以通过求解 (15) 和 (16) 的可行解得到.

注 9. 在定理 2 中, γ 为给定的常数值, 相对应所设计的 H_2/H_∞ 滤波器是次优滤波器. 反之, 若 γ 未知时, 通过以下定理 3 设计出最优的 H_2/H_∞ 滤波器.

定理 3. 若 γ 未知时, 在已知有线网络和无线网络分别存在最长网络诱导延时 τ 和 d 的情况下, 若存在正定对称矩阵 $P(i, r)$ 和 $P(j, s)$, 矩阵 $\bar{y}_{1m'}, \bar{y}_{2i'}, \bar{y}_{3m'}, m' = 1, 2, 3, i' = 1, 2, H(i, r), O(i, r), C_f(i, r)$ 以及参数 ρ , 使如下矩阵不等式组成立:

$$\begin{cases} \min \rho \\ \text{s.t. (15), (16)} \end{cases} \quad (18)$$

式中, $\rho = \gamma^2$, 则滤波误差动态系统随机稳定且满足 H_2/H_∞ 性能 γ .

4 仿真例子

考虑卫星偏航角控制系统^[15, 25], 它由两个刚体通过一个挠性构件连接起来, 并且该挠性构件能够建模成一个带有扭矩常数为 k 和粘滞阻尼为 f 的弹簧. 主体和仪表模块的偏航角分别定义为 θ_1 和 θ_2 , 控制力矩为 $u(t)$, 两个刚体的转动惯

量分别为 J_1, J_2 . 它的状态空间表达式为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1(t) \\ \dot{\theta}_2(t) \\ \dot{\delta}_1(t) \\ \dot{\delta}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -k & k & -f & f \\ k & -k & f & -f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1(t) \\ \theta_2(t) \\ \delta_1(t) \\ \delta_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} u(t)$$

通过选择 $J_1 = J_2 = 1, k = 0.3, f = 0.004$, 设采样周期为 $T = 0.1\text{s}$ 且局部控制器 $u(t) = 10^3[-0.1591, -5.9343, -0.0172, -2.8604]x(k)$, 并采用文献 [15] 设定噪声方法, 得到带有噪声的离散系统状态方程:

$$x(k+1) = Ax(k) + Bw(k)$$

式中, $x(k) = [\theta_1(k) \ \theta_2(k) \ \delta_1(k) \ \delta_2(k)]^T$,

$A =$

$$\begin{bmatrix} 0.2035 & -29.6580 & 0.0142 & -14.2960 \\ 0.0012 & 0.9871 & 0.0000 & 0.0944 \\ -15.9256 & -592.9813 & -0.7168 & -285.8330 \\ 0.0188 & -0.4451 & 0.0007 & 0.7980 \end{bmatrix}$$

$B =$

$$\begin{bmatrix} 0.000150 & 0.000305 & 0.0001565 & 0.0000525 \end{bmatrix}^T$$

系统被调输出为 $z(k) = Lx(k)$, 并且系统两输出为 $y = Cx(k) + Dw(k)$, 式中, $L = [1 \ 1 \ 0 \ 0]$,

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.5 \end{bmatrix}.$$

目前卫星测控网中的无线网段主要采用无线载波通信而有线网段主要采用以太网通信. 设无线网络和有线网络的最长网络诱导延时 d 和 τ 都为 1, 由于为两输出系统则 $d_k = [d_k^1, d_k^2] \in \{0, 1\}, \tau_k = [\tau_k^1, \tau_k^2] \in \{0, 1\}$. 由于 k 时刻 $\tau_k^p = i, d_{k-\tau_k^p}^p = r$ 跳变到 $k+1$ 时刻 $\tau_{k+1}^p = j, d_{k+1-\tau_{k+1}^p}^p = s, p = 1, 2$, 故有 4 种模态, 相应的马尔科夫跳变概率用如下矩阵表示: $\Lambda = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.7 \\ 0.6 & 0.4 \end{bmatrix}, \Pi = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.6 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$.

根据定理 3, 通过求解 (18) 可得最优扰动衰减性能指标, 并与文献 [15] 中模型依赖 H_∞ 滤波方法在相同的网络环境下进行对比, 如表 1 所示. 从表 1 中可以发现, 针对受多通道通信约束的网络化系统, 本文所提的方法与文献 [15] 中方法相比, 具有较低的扰动衰减指标, 即具有更高的扰动衰减能力, 因此, 具有更低的保守性.

表 1 最优扰动衰减性能指标对比

Table 1 Comparison of the minimum noise attenuation level

方法	最优扰动衰减性能指标 (γ^*)
本文所提 H_2/H_∞ 滤波方法	0.0046
文献 [15] 中 H_∞ 滤波方法	0.1306

进一步分析网络不确定性因素对系统稳定性的影响, 在一个通道 $k = 1$ 至 100 步, 信号通过无线网络和有线网络到达滤波器, 图 3 给出了一种情况下的网络状态图 (模态 1: 23%, 模态 2: 21%, 模态 3: 24%, 模态 4: 32%). 假设 $w(k) = 0$ 且系统初始条件为 $x(0) = [0.2, 0.6, 0.1, -0.8]^T$, 图 4 展示了 3 种不同网络状态下的滤波估计误差, 可以发现误差都收敛到零.

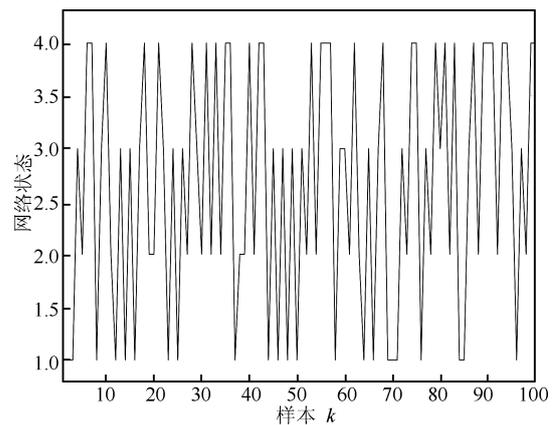


图 3 网络状态图 (值 1、2、3、4 分别代表模态 1、2、3 和 4)

Fig. 3 Networked state (Numerical values 1, 2, 3, 4 represent mode 1, 2, 3 and 4, respectively.)

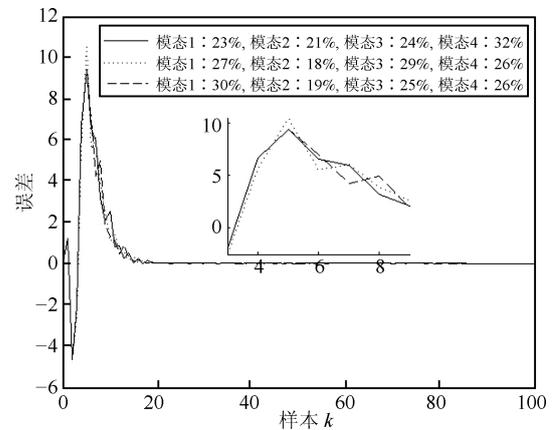


图 4 滤波误差动态系统的误差图

Fig. 4 The error of filtering error dynamic system

对给定的 H_2/H_∞ 性能 $\gamma = 1$, 根据定理 2, 可得到 4 个不同模态下对应的 H_2/H_∞ 滤波器, 具体如下:

第 1 种模态下滤波器的参数:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.3817 & 0.8901 & 0.0341 & -2.2918 \\ 0.0095 & 0.0647 & -0.0004 & -0.1775 \\ -1.0912 & 8.3936 & -0.0214 & -24.8248 \\ -0.0087 & -0.2234 & -0.0002 & 0.6107 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} -0.9183 & 1.8441 \\ 0.0214 & -0.0445 \\ 8.0810 & -15.9983 \\ -0.0374 & 0.0743 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = [0.0753 \quad -0.8498 \quad 0.0238 \quad 2.1940]$$

第 2 种模态下滤波器的参数:

$$A_2 = \begin{bmatrix} -0.3863 & 1.8598 & 0.0565 & -5.4073 \\ 0.0127 & 0.0510 & -0.0010 & -0.1282 \\ -0.8371 & 3.5267 & -0.1560 & -7.2597 \\ -0.0174 & -0.2155 & 0.0009 & 0.5670 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} -0.6283 & 1.2684 \\ 0.0163 & -0.0343 \\ 5.1763 & -10.1474 \\ -0.0293 & 0.0583 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = [0.3829 \quad -4.4264 \quad 0.0743 \quad 11.0991]$$

第 3 种模态下滤波器的参数:

$$A_3 = \begin{bmatrix} -0.3227 & 1.5876 & 0.0560 & -4.4976 \\ 0.0110 & 0.0462 & -0.0009 & -0.1199 \\ 0.5201 & 0.1436 & -0.2869 & 1.6498 \\ -0.0171 & -0.1767 & 0.0008 & 0.4682 \end{bmatrix}$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} -0.5716 & 1.1504 \\ 0.0145 & -0.0300 \\ 6.6188 & -13.0995 \\ -0.0294 & 0.0587 \end{bmatrix}$$

$$C_3 = [0.1697 \quad -0.2428 \quad 0.3824 \quad 1.8844]$$

第 4 种模态下滤波器的参数:

$$A_4 = \begin{bmatrix} -0.0279 & 2.0997 & 0.0371 & -5.8463 \\ 0.0033 & 0.0180 & -0.0005 & -0.0436 \\ -4.0069 & -4.0050 & -0.0718 & 12.0040 \\ 0.0008 & -0.1143 & -0.0001 & 0.2997 \end{bmatrix}$$

$$B_4 = \begin{bmatrix} -0.5961 & 1.2009 \\ 0.0168 & -0.0346 \\ 5.3150 & -10.4793 \\ -0.0318 & 0.0636 \end{bmatrix}$$

$$C_4 = [-0.0666 \quad -0.0404 \quad 0.0143 \quad -0.0058]$$

下面进一步分析网络不确定性因素对滤波器性能的影响, 假设在零初始条件下, 干扰输入为

$$w(k) = \begin{cases} 0.2, & 21 \leq k \leq 50 \\ 0, & 1 \leq k \leq 20, 51 \leq k \leq 100 \end{cases}$$

表 2 给出了不同网络状态下的滤波器性能指标, 从中可以发现尽管在不同网络状态下的滤波器性能指标不尽相同, 但所有计算所得 H_2/H_∞ 性能指标 γ 均小于给定值 1, 这进一步证明了文中所提方法的有效性.

表 2 不同模态下的滤波器 H_2/H_∞ 性能指标
Table 2 The H_2/H_∞ noise attenuation level under different modes

模态 1 (%)	模态 2 (%)	模态 3 (%)	模态 4 (%)	H_2/H_∞ 性能指标 (γ)
23	21	24	32	2.1894E-005
27	18	29	26	2.0471E-005
30	19	25	26	2.0048E-005

5 结论

本文将目前普遍研究的单种类型网络拓展到更加复杂的多通道异构网络, 建立了更具普适性的融合多通道异构网络通信约束的滤波误差动态系统综合模型, 证明了在已知有线网络和无线网络分别存在的最长网络诱导延时情况下, 所设计的滤波器使得滤波误差系统随机稳定且满足 H_2/H_∞ 性能, 解决了受复杂多通道异构网络通信约束的网络化系统 H_2/H_∞ 滤波器设计问题. 但是, 在异构网络系统滤波器设计中, 无线和有线通道在同一时刻以及不同时刻的网络诱导延时也可能不尽相同, 进行相关滤波器研究是本文的下一步工作. 此外, 由于无线传感节点数据发送能耗较大且网络带宽容量有限, 考虑数据状态信息以及网络实时性能, 进行基于无线传感节点触发机制的异构网络系统滤波器设计, 也是今后值得研究的一个方向.

References

- Zhang L X, Gao H J, Kaynak O. Network-induced constraints in networked control systems — a survey. *IEEE transactions on Industrial Informatics*, 2013, **9**(1): 403–416
- You Ke-You, Xie Li-Hua. Survey of recent progress in networked control systems. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(2): 101–118
(游科友, 谢立华. 网络控制系统的最新研究综述. *自动化学报*, 2013, **39**(2): 101–118)
- Du Da-Jun, Fei Min-Rui, Song Yang, Li Xue. Brief survey and prospect of networked control systems. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, **32**(3): 713–720
(杜大军, 费敏锐, 宋杨, 李雪. 网络控制系统的简要回顾及展望. *仪器仪表学报*, 2011, **32**(3): 713–720)
- Julián P. Guest editorial special section on industrial communication systems. *IEEE Transactions Industrial Informatics*, 2010, **6**(3): 365–368
- Cetinvez Y, Bayindir R. Design and implementation of an internet based effective controlling and monitoring system with wireless fieldbus communications technologies for process automation — an experimental study. *ISA Transactions*, 2012, **51**(3): 461–470
- Xia Y Q, Li L, Mahmoud M, Yang H J. H_∞ filtering for nonlinear singular Markovian jumping systems with interval time-varying delays. *International Journal of Systems Science*, 2012, **43**(2): 272–284

- 7 Guo Ge, Wang Bao-Feng. Robust Kalman filtering for uncertain discrete-time systems with multiple packet dropouts. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(5): 767–772
(郭戈, 王宝凤. 多丢包不确定离散系统的鲁棒 Kalman 滤波. 自动化学报, 2010, **36**(5): 767–772)
- 8 Chen Bo, Yu Li, Zhang Wen-An. Robust Kalman filtering for uncertain discrete time-delay systems with missing measurement. *Acta Automatica Sinica*, 2011, **37**(1): 123–128
(陈博, 俞立, 张文安. 具有测量数据丢失的离散不确定时滞系统鲁棒 Kalman 滤波. 自动化学报, 2011, **37**(1): 123–128)
- 9 Chen P, Fei M R. Networked H_∞ filtering for discrete linear systems with a periodic event-triggering communication scheme. *IET Signal Processing*, 2013, **78**: 754–765
- 10 Fu Ling-Yun, He Yong, Wu Min. H_∞ filter design based on time-delay and its application to network. *Control Theory & Applications*, 2010, **27**(4): 517–522
(扶凌云, 何勇, 吴敏. 基于时滞的 H_∞ 滤波器设计及其在网络中的应用. 控制理论与应用, 2010, **27**(4): 517–522)
- 11 Yang R N, Shi P, Liu G P. Filtering for discrete-time networked nonlinear systems with mixed random delays and packet dropouts. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, **56**(11): 2655–2660
- 12 Dong H L, Wang Z W, Gao H J. Robust H_∞ filtering for a class of nonlinear networked systems with multiple stochastic communication delays and packet dropouts. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2010, **58**(4): 1957–1965
- 13 Wang Wu, Yang Fu-Wen. Robust H_∞ filtering for networked uncertain systems with random time delays. *Acta Automatica Sinica*, 2007, **33**(5): 557–560
(王武, 杨富文. 随机时延网络化不确定系统的鲁棒 H_∞ 滤波. 自动化学报, 2007, **33**(5): 557–560)
- 14 Li Xiu-Ying, Wang Jin-Yu, Sun Shu-Li. H_∞ filter design for networked control systems with one-step random delays and multiple packet dropouts. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(1): 155–160
(李秀英, 王金玉, 孙书利. 具有一步随机时滞和多丢包的网路系统 H_∞ 滤波器设计. 自动化学报, 2014, **40**(1): 155–160)
- 15 Zhang W A, Yu L, Song H B. H_∞ filtering of networked discrete-time systems with random packet losses. *Information Sciences*, 2009, **179**(22): 3944–3955
- 16 Zhang H, Shi Y, Mehr A S. Robust weighted H_∞ filtering for networked systems with intermittent measurements of multiple sensors. *International Journal of Adaptive control and Signal Processing*, 2011, **25**(4): 313–330
- 17 Salehin K M, Rojas-Cessa R. Active scheme to measure throughput of wireless access link in hybrid wired-wireless network. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2012, **1**(6): 645–648
- 18 Fei Min-Rui, Wang Hai-Kuan, Wang Jia-Cheng, Huang Dan-Qing, Ma Cheng-Xi, Fu Jing-Qi. A Multi-protocol Gateway and Protocol Conversion Method for Industrial Wireless Network Access Industrial Ethernet and Fieldbus, China, Patent: ZL200810201578.8, October 2011
(费敏锐, 王海宽, 王佳承, 黄丹青, 马成喜, 付敬奇. 工业无线网络接入工业以太网和现场总线的多协议网关及协议转换方法, 中国, 发明专利号 ZL200810201578.8, 2011 年 10 月)
- 19 Mirabella O, Brischetto M. A hybrid wired/wireless networking infrastructure for greenhouse management. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2011, **60**(2): 398–407
- 20 Hwang C L, Chang L J. Internet-based smart-space navigation of a car-like wheeled robot using fuzzy-neural adaptive control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2008, **16**(5): 1271–1284
- 21 Hu S L, Yue D, Liu J L. H_∞ filtering for networked systems with partly known distribution transmission delays. *Information Sciences*, 2012, **194**: 270–282
- 22 Sadeghi P, Kennedy R A, Rapajic P B, Shams R. Finite-state Markov modeling of fading channels — a survey of principles and applications. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, **25**(5): 57–80
- 23 Park P, Marco P D, Fischione C, Johansson K H. Modeling and optimization of the IEEE 802.15.4 protocol for reliable and timely communications. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2013, **24**(3): 550–564
- 24 Shi Y, Yu B. Output feedback stabilization of networked control systems with random delays modeled by Markov chains. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, **54**(7): 1668–1674
- 25 Biernacki R M, Hwang H, Bhattacharyya S P. Robust stability with structured real parameter perturbations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1987, **32**(6): 495–506

杜大军 上海大学机电工程与自动化学院副研究员. 主要研究方向为网络控制系统的滤波与先进控制. E-mail: ddj@shu.edu.cn
(DU Da-Jun Associate professor at the School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University. His research interest covers filtering and advanced control for networked control systems.)

宋志华 上海大学机电工程与自动化学院硕士研究生. 主要研究方向为网络系统的滤波. 本文通信作者.
E-mail: mengjie3190021@163.com
(SONG Zhi-Hua Master student at the School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University. His research interest covers filtering for networked systems. Corresponding author of this paper.)

费敏锐 上海大学机电工程与自动化学院教授. 主要研究方向为网络控制系统及实现. E-mail: mrfei@staff.shu.edu.cn
(FEI Min-Rui Professor at the School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University. His research interest covers networked control system and its implementation.)

王海宽 上海大学机电工程与自动化学院讲师. 主要研究方向为异构网络系统及应用. E-mail: eeewhk@163.com
(WANG Hai-Kuan Lecturer at the School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University. His research interest covers hybrid network and its application.)