

# 多包丢失的无线网络控制系统的滤波器设计

马运强<sup>1,2</sup>, 武昌俊<sup>2</sup>

(1. 安徽工程大学电气工程学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 安徽机电职业技术学院电气工程系, 安徽 芜湖 241002)

**摘要:** 鉴于无线网络控制系统中多包丢失率不同和外部噪音干扰问题, 研究了一类多包丢失的无线网络控制系统  $H_\infty$  滤波器设计方法, 以提高无线网络控制系统稳定性及鲁棒性。首先, 引入随机伯努利序列搭建多传感器通道中丢包模型, 并将每个通道丢包率转化为滤波误差系统的随机参数, 进而将滤波问题转化为求解带有随机参数的滤波误差系统的  $H_\infty$  性能指标问题; 在此基础上, 利用矩阵论和概率论原理将数据参数分解, 通过 LMIs 形式给出  $H_\infty$  滤波器存在的充分条件, 所设计的滤波器能保证在外部能量有界噪音干扰信号, 滤波误差系统的  $H_\infty$  指标小于给定值  $\gamma$ 。最后通过一个数值仿真示例验证了所设计滤波器的有效性。

**关键词:** 无线网络控制系统;  $H_\infty$  滤波器; 多数据丢包; 随机变量

**中图分类号:** TP273

**文献标志码:** A

## 引言

随着计算机、通信网络、控制技术等发展, 在无线网络平台上构筑而成的无线网络控制系统 (Wireless Networked Control Systems, WiNCS) 已成控制系统领域技术研究和发展的前沿热点之一<sup>[1-4]</sup>。WiNCS 就是把无线网络作为系统中的传感器、控制器、执行器通信通道, 进而实现系统信号传输和资源共享。由于 WiNCS 将自动控制技术和网络技术相结合, 构筑成分布式系统, 摆脱了传统点对点连接的束缚, 降低了安装成本、拓宽了控制活动的场所, 使得无线网络控制系统应用更加广泛<sup>[5-6]</sup>。但是由于无线通信信道的介入导致传感器的测量数据往往存在噪音干扰<sup>[7-8]</sup>, 不可避免发生数据丢包现象。因此, 需设计滤波器来消除外部噪音干扰和数据丢包的影响。

无线网络控制系统的滤波技术研究是控制科学领域的一个研究热点, 众多国内外学者做了大量的研究并取得了丰富的成果。目前关于随机丢包的网络滤波

器设计技术主要集中在传感器单包传输系统<sup>[9-13]</sup>, 有关传感器通道存在多包丢失的 WiNCS 滤波器设计问题研究很少。文献[14]研究了一类不确定网络控制系统, 将传感器到滤波器的数据丢包刻画为分布式伯努利随机序列; 文献[15]研究了不确定丢包的无线网络控制系统, 滤波误差系统建模为随机概率不确定系统, 通过 LMI 形式给出滤波器存在的充分条件; 文献[16]研究了一类存在信道约束多通道丢包的  $H_2/H_\infty$  滤波技术, 利用最大数据包错序的方法搭建多通道丢包和时延模型, 给出滤波误差系统随机稳定的条件。本文在研究以上文献的基础上, 探讨传感器通道存在多包丢失的无线网络控制系统滤波器设计问题。将每个传感器通道中数据丢包过程刻画为独立伯努利序列, 利用随机变量分解原理分析得知滤波误差系统随机稳定并具有  $\gamma$  性能指标。

## 1 问题描述

考虑一类无线网络控制系统 (WiNCS), 如图 1 所

收稿日期: 2016-09-17

基金项目: 安徽机电职业技术学院重点科研项目 (2016zdzzr12)

作者简介: 马运强 (1989-), 男, 安徽亳州人, 助教, 硕士, 主要从事网络滤波方面的研究, (E-mail) ahjdmyq@126.com

示,被控对象的状态空间描述  $\Sigma_1$ :

$$\Sigma_1: \begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B_1w(k) \\ y(k) = Cx(k) + B_2w(k) \\ z(k) = \Gamma_0x(k) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x(k) \in \mathbb{R}^m$  为系统的状态向量,  $y(k) \in \mathbb{R}^n$  为系统的测量输出向量,  $z(k) \in \mathbb{R}^p$  为系统的待估计信号,  $w(k) \in l_2[0, \infty)$  表示为能量有界的干扰信号。  $A$ 、  $B_1$ 、  $B_2$ 、  $C$ 、 和  $\Gamma_0$  具有相应维数常值矩阵。

考虑如下离散时不变滤波器  $F$ :

$$F: \begin{cases} x_f(k+1) = A_fx_f(k) + B_f\bar{y}(k) \\ z_f(k) = C_fx_f(k) + D_f\bar{y}(k) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $x_f(k) \in \mathbb{R}^m$ ,  $y_f(k) \in \mathbb{R}^n$ ,  $z_f(k) \in \mathbb{R}^p$  分别表示为滤波器的状态向量和输入向量, 滤波器的输出向量,  $A_f$ 、  $B_f$ 、  $C_f$  和  $D_f$  待求解参数矩阵。

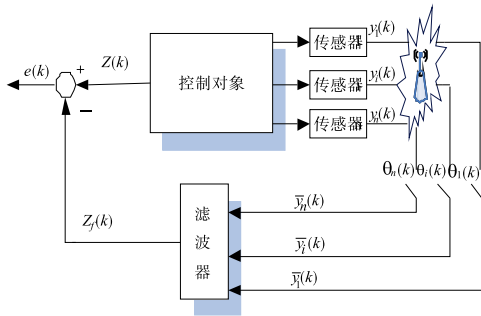


图 1 具有丢包网络滤波控制系统

无线网络控制系统通过无线通道将传感器信息传输到滤波器输入端, 由于网络拥堵或网络故障等原因信息传输会发生数据丢包现象。应用分布式伯努利随机序列描述传感器到滤波器的数据丢包,  $\theta_i(k) = 1$  表示第  $i$  个传感器信息传输成功, 没有发生数据丢包, 概率分布描述为  $Pr[\theta_i(k) = 1] = E[\theta_i(k)] = \theta_i$ ,  $\bar{y}_i(k) = y_i(k)$ 。  $\theta_i(k) = 0$  表示第  $i$  个传感器信息传输失败, 发生数据丢包, 采用保持输入策略, 即:  $\bar{y}_i(k) = \bar{y}_i(k-1)$ , 概率分布描述为  $Pr[\theta_i(k) = 0] = 1 - \theta_i$ ,  $Var[\theta_i(k)] = \theta_i(1 - \theta_i) = \xi_i^2$ 。其中  $\theta_i$  为已知标量, 综上所述滤波器的数据输入可以表述为:

$$\begin{aligned} \bar{y}_i(k) &= \theta_i(k)y_i(k) + (1 - \theta_i(k))\bar{y}_i(k-1) \\ \bar{y}(k) &= \theta(k)y(k) + (I - \theta(k))\bar{y}(k-1) \end{aligned} \quad (3)$$

其中,  $\theta(k) = diag[\theta_1(k) \cdots \theta_i(k) \cdots \theta_n(k)]$ 。

结合式(1)~式(3), 构建滤波误差系统模型, 定义增广向  $X(k) = [x^T(k) \ x_f^T(k) \ \bar{y}^T(k-1)]^T$ , 滤波误差  $e(k) = z(k) - z_f(k)$ 。

$$\begin{cases} X(k+1) = \Phi X(k) + Bw(k) \\ e(k) = \Gamma X(k) + Dw(k) \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$\Phi = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ B_f\theta(k)C & A_f & B_f(I - \theta(k)) \\ \theta(k)C & 0 & I - \theta(k) \end{bmatrix}$$

$$B = [B_1 \ B_f\theta(k)B_2 \ \theta(k)B_2]^T$$

$$\Gamma = [\Gamma_0 - D_f\theta(k)C \ -C_f \ -D_f(I - \theta(k))]$$

$$D = [-D_f\theta(k)B_2]$$

本文所研究的  $H_\infty$  滤波的目标就是为系统  $\Sigma_1$  设计形如式(2)的离散滤波器, 并满足下列条件:

- (1) 当  $w(k) = 0$ , 滤波误差系统(4)是随机稳定。
- (2) 在零初始状态下滤波误差系统(4), 对于任意给定的标量  $\gamma > 0$ , 满足  $H_\infty$  性能指标:

$$E\{\|e(k)\|_2^2\} \leq \gamma^2 \|w(k)\|_2^2 \quad (5)$$

对于满足上述条件的滤波器称为  $H_\infty$  滤波器具有  $\gamma$  抑制水平。

## 2 滤波性能分析

**定理 1** 对于给定标量  $\gamma > 0$ , 正定矩阵  $P$ , 滤波系统(4)随机稳定, 且滤波器满足  $H_\infty$  性能指标, 需使得不等式(6)成立。

$$\begin{bmatrix} -P & 0 & \Phi_1^T & \Phi_\zeta^T & \Gamma_1^T & \Gamma_\zeta^T & 0 \\ * & -\gamma^2 & \tilde{B}_1^T & B_\zeta^T & 0 & 0 & D_\zeta^T \\ * & * & P^{-1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & P^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

其中:

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & A_f & B_f \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix}, \tilde{B}_1 = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, D_\zeta = [-D_f\zeta B_2]$$

$$\Gamma_1 = [\Gamma_0 \ -C_f \ -D_f], \Gamma_\zeta = [-D_f\zeta C \ 0 \ D_f\zeta]$$

$$\Phi_\zeta = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ B_f\zeta C & 0 & -B_f\zeta \\ \zeta C & 0 & -\zeta \end{bmatrix}, B_\zeta = \begin{bmatrix} 0 \\ B_f\zeta B_2 \\ \zeta B_2 \end{bmatrix}$$

**证明:**

(1) 当  $w(k) = 0$  时, 选用如下的 Lapunov 函数,  $P$  为正定矩阵, 证明滤波误差系统(4)是随机稳定。

$$V(k) = X(k)^T P X(k) \quad (7)$$

$$\Delta V(k) = E\{V(k+1)\} - V(k) =$$

$$E\{X(k+1)^T P X(k+1)\} - X(k)^T P X(k) =$$

$$X(k)^T E\{\Phi^T P \Phi - P\} X(k) \quad (8)$$

由于  $\Phi$  含有随机参数,难以直接求解,为了消除式(8)参数的随机不确定性,引入变量:

$$\begin{aligned} \theta_i(k) &= \theta_i + \delta_i \\ V_{ar}[\theta_i(k)] &= V_{ar}[\delta_i] = \zeta_i^2 \\ \theta(k) &= \theta + \zeta \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $\theta = \text{diag}[\theta_1 \cdots \theta_i \cdots \theta_n]$ ,  $\zeta = \text{diag}[\zeta_1 \cdots \zeta_i \cdots \zeta_n]$ 。将含有随机参数的矩阵进行分解  $\Phi = \Phi_1 + \bar{\Phi}_1 \theta(k) \bar{\Phi}_2$ , 根据文献[12]方法可知  $E\{\Phi^T \Phi\} = \Phi_1^T \Phi_1 + \Phi_\zeta^T \Phi_\zeta$ , 其中  $\Phi_\zeta = \bar{\Phi}_1 \zeta \bar{\Phi}_2$ , 代入式(8)可得:

$$\Delta V(k) = X(k)^T \bar{\Omega} X(k) \quad (10)$$

其中,  $\bar{\Omega} = \Phi_1^T P \Phi_1 + \Phi_\zeta^T P \Phi_\zeta - P$ 。由于式(6)蕴含着  $\bar{\Omega} < 0$ , 即  $\Delta V(k) < 0$ 。

$$\Delta V(k) \leq -\lambda_{\min}(-\bar{\Omega}) X(k)^T X(k) \leq -\xi x(k)^T x(k) \quad (11)$$

两边同时累加求和得:

$$\begin{aligned} E\{V(\infty) - V(0)\} &\leq -\xi \sum_{k=1}^{\infty} x(k)^T x(k) \\ \sum_{k=1}^{\infty} x(k)^T x(k) &\leq \xi^{-1} x(0)^T x(0) < \infty \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $-\lambda_{\min}(-\bar{\Omega})$  为  $\bar{\Omega}$  的最小特征值,  $\xi$  为  $\inf\{-\lambda_{\min}(-P)\}$ , 则滤波误差系统(4)随机稳定。

(2) 当  $w(k) \in l_2[0, \infty)$  时, 在零初始状态下分析滤波误差系统的  $H_\infty$  性能指标。

$$\begin{aligned} J \triangleq E\{e(k)^T e(k) - \gamma^2 w(k)^T w(k)\} &\leq \\ E\{e(k)^T e(k) - \gamma^2 w(k)^T w(k) + \Delta V(k)\} &= \\ \eta(k)^T \Omega \eta(k) \end{aligned} \quad (13)$$

其中,  $\eta(k) = [X(k)^T w(k)^T]^T$ , 同理可知

$$\begin{aligned} E\{B^T B\} &= \bar{B}_1^T \bar{B}_1 + B_\zeta^T B_\zeta \\ E\{\Gamma^T \Gamma\} &= \Gamma_1^T \Gamma_1 + \Gamma_\zeta^T \Gamma_\zeta \\ E\{D^T D\} &= D_\zeta^T D_\zeta \end{aligned}$$

代入式(13)可得:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \Phi_1^T P \Phi_1 + \Phi_\zeta^T P \Phi_\zeta + \Gamma_1^T \Gamma_1 + \Gamma_\zeta^T \Gamma_\zeta - P & & \\ * & \Phi_1^T P \bar{B}_1 + \Phi_\zeta^T P B_\zeta & \\ & \bar{B}_1^T P \bar{B}_1 + B_\zeta^T P B_\zeta + D_\zeta^T D_\zeta - \gamma^2 I & \end{bmatrix}$$

由 schur 定理可证明式(6)保证了  $\Omega < 0$ , 即:

$$\Delta V(k) + e(k)^T e(k) - \gamma^2 w(k)^T w(k) < 0 \quad (14)$$

对式(14)从  $k = 0$  到  $k = \infty$  累加取和可得:

$$\begin{aligned} V(\infty) - V(0) + E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} e(k)^T e(k)\right\} - \\ \gamma^2 \sum_{k=0}^{\infty} w(k)^T w(k) < 0 \end{aligned}$$

在零初始状态下  $V(0) = 0$ ,  $V(\infty) > 0$  即:

$E\{\|e(k)\|_2^2\} \leq \gamma^2 \|w(k)\|_2^2$ , 则滤波器具有  $H_\infty$  性能指标。

### 3 滤波器设计

**定理2** 对于离散系统  $\Sigma_1$ , 给定标量  $\gamma > 0$ , 若存在适当维数的正定矩阵  $P$  和矩阵  $J$ 、 $M$ 、 $N$ 、 $S$  和  $Q$  使下面线性矩阵不等式成立, 则滤波误差系统(4)是随机稳定的, 且滤波器具有  $H_\infty$  性能指标。

$$\begin{bmatrix} \Xi_1 & \Xi_2 & \Xi_3 \\ * & \Xi_4 & 0 \\ * & * & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (15)$$

其中:

$$\Xi_1 = \begin{bmatrix} -P & 0 \\ 0 & -\gamma^2 I \end{bmatrix}, \quad \Xi_2 = \begin{bmatrix} \Xi_{21} & \Xi_{22} \\ \Xi_{23} & \Xi_{24} \end{bmatrix}$$

$$\Xi_3 = \begin{bmatrix} \Gamma_1^T & \Gamma_\zeta^T & 0 \\ 0 & 0 & D_\zeta^T \end{bmatrix}$$

$$\Xi_{21} = \begin{bmatrix} A^T J_{11} & A^T J_{12} & A^T J_{13} \\ M & M & 0 \\ N + J_{31} & N + J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}$$

$$\Xi_4 = \text{diag}[P - J - J^T \quad P - J - J^T]$$

$$\Xi_{22} = \begin{bmatrix} C^T \zeta^T N + C^T \zeta^T J_{31} & C^T \zeta^T N + C^T \zeta^T J_{32} & C^T \zeta^T J_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ -\zeta^T N - \zeta^T J_{31} & -\zeta^T N - \zeta^T J_{32} & -\zeta^T J_{33} \end{bmatrix}$$

$$\Xi_{23} = [B_1^T J_{11} \quad B_1^T J_{12} \quad B_1^T J_{13}]$$

$$\Xi_{24} = [B_2^T \zeta^T N + B_2^T \zeta^T J_{31} \quad B_2^T \zeta^T N + B_2^T \zeta^T J_{32} \quad B_2^T \zeta^T J_{33}]$$

$$\Gamma_1 = [\Gamma_0 \quad -S \quad -Q]$$

$$\Gamma_\zeta = [-Q\zeta C \quad 0 \quad Q\zeta]$$

$$D_\zeta = [-Q\zeta B_2]$$

若满足上述条件, 则可由式(16)求解滤波器的参数。

$$A_f = (MJ_{21}^{-1})^T, B_f = (NJ_{21}^{-1})^T, C_f = S, D_f = Q \quad (16)$$

**证明** 式(6)含有随机变量, 无法直接使用 LMI 求解。引入矩阵  $J$ , 其形式如下:

$$J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{21} & 0 \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}$$

对式(6)左乘  $\bar{J} = \text{diag}[I \quad I \quad J^T \quad J^T \quad I \quad I]$ 、右乘  $\bar{J}^T$ , 由于  $P > 0$ ,  $(J - P)P^{-1}(J - P)^T \geq 0$ , 因此  $-J^T P^{-1} J \leq P - J - J^T$ , 代入式(6)化简得:

$$\begin{bmatrix} -P & 0 & \Phi_1^T J & \Phi_\zeta^T J & \Gamma_1^T & \Gamma_\zeta^T & 0 \\ * & -\gamma^2 & \tilde{B}_1^T J & B_\zeta^T J & 0 & 0 & D_\zeta^T \\ * & * & P - J - J^T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & P - J - J^T & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0$$

其中:

$$\Phi_1^T J = \begin{bmatrix} A^T J_{11} & A^T J_{12} & A^T J_{13} \\ A_f^T J_{21} & A_f^T J_{21} & 0 \\ B_f^T J_{21} + J_{31} & B_f^T J_{21} + J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}$$

$$\Phi_\zeta^T J = \begin{bmatrix} C^T \zeta^T B_f^T J_{21} + C^T \zeta^T J_{31} \\ 0 \\ -\zeta^T B_f^T J_{21} - \zeta^T J_{31} \\ C^T \zeta^T B_f^T J_{21} + C^T \zeta^T J_{32} & C^T \zeta^T J_{33} \\ 0 & 0 \\ -\zeta^T B_f^T J_{21} - \zeta^T J_{32} & -\zeta^T J_{33} \end{bmatrix}$$

$$\tilde{B}_1^T J = [B_1^T J_{11} \quad B_1^T J_{12} \quad B_1^T J_{13}] B_\zeta^T J = [B_2^T \zeta^T B_f^T J_{21} + B_2^T \zeta^T J_{31} B_2^T \zeta^T B_f^T J_{21} + B_2^T \zeta^T J_{32} B_2^T \zeta^T J_{33}]$$

将上式代入化简就能得到定理 2 中的不等式(15)。

### 4 仿真示例

考虑如下离散时不变系统:

$$A = \begin{bmatrix} -0.5 & 0 \\ 0.36 & -0.24 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0.5 \\ -0.2 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.28 \\ -0.3 & 0.15 \end{bmatrix}$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} -0.3 \\ 0.2 \end{bmatrix} \Gamma_0 = [0.4 \quad -0.6]$$

取噪声信号  $w(k) = 2e^{-0.4k} \sin(0.4\pi k)$ ,  $\gamma^* = 1$ , 传感器节点 1 和 2 的数据传输成功率分别取  $\theta_1 = 0.9$  和  $\theta_2 = 0.8$ , 计算得  $\zeta_1 = 0.3, \zeta_2 = 0.4$ 。根据定理 2 和 Matlab LMI 工具箱可求取一组  $H_\infty$  滤波器参数可行解:

$$A_f = \begin{bmatrix} -0.3010 & 0.0678 \\ -0.1729 & 0.1454 \end{bmatrix}$$

$$B_f = \begin{bmatrix} 0.4225 & -1.1318 \\ -0.1274 & 0.4118 \end{bmatrix}$$

$$C_f = [0.1494 \quad -0.2245]$$

$$D_f = [0.0060 \quad 0.3028]$$

假设系统的初始状态  $x(0) = [0.1 \quad -0.1]^T$ , 滤波器系统的初始状态  $x_f(0) = [0 \quad 0]^T$ , 系统的状态和滤波

器状态仿真结果如图 2 和图 3 所示。从图 2 和图 3 可以得出滤波器的信号  $x_f(k)$  能够较好地消除噪音扰动信号、估计系统的真实值。滤波误差仿真如图 4 所示, 从图 4 中得出滤波误差  $e(k)$  随着时间的推移趋于 0。因此, 本文针对具有随机丢包的无线网络控制系统所设计的滤波器具有一定的有效性。

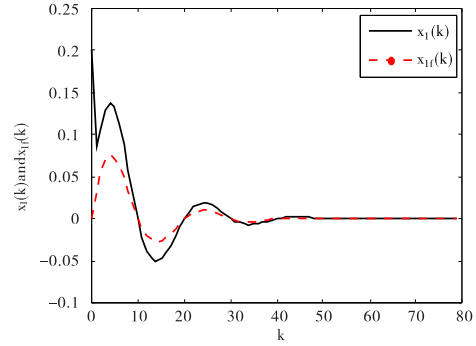


图 2 真实状态  $x_1(k)$  与滤波状态  $x_{1f}(k)$

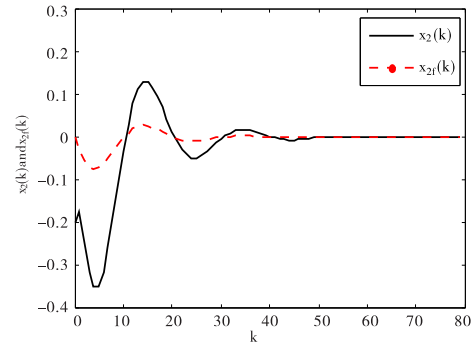


图 3 真实状态  $x_2(k)$  与滤波状态  $x_{2f}(k)$

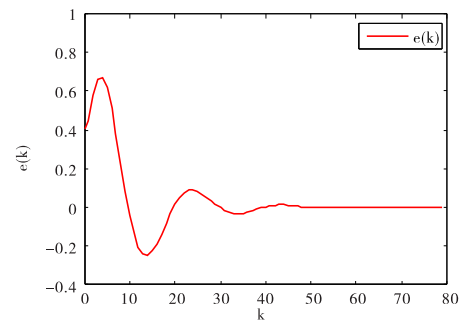


图 4 滤波误差  $e(k)$

### 5 结束语

本文探讨了一类传感器通道存在多包丢失的 WiNCS 滤波器设计问题, 运用伯努利序列搭建多包模型并将丢包率转化为随机参数。通过分解系统中不确定矩阵及运用  $H_\infty$  滤波性能指标, 将 WiNCS 中的滤波误差系统稳定性分析问题转化求解一组 LMI 问题进而获得  $H_\infty$  滤波参数。最后通过仿真示例证明了所设计滤波器

的有效性。

#### 参考文献:

- [1] 杜大军,费敏锐.网络控制系统的简要回顾及展望[J].仪器仪表学报,2011,32(3):713-720.
- [2] 林进攀,吴英,吴功宜,等.基于信息物理融合系统的紧耦合网络控制方法[J].通信学报,2015,36(2):130-140.
- [3] 林强,吴国伟,刘玥瑶,等.一种无线网络控制系统概率性任务实时调度算法[J].大连理工大学学报,2015,55(6):638-643.
- [4] WANG L Y,GE G.Control with a random access protocol and packet dropouts[J].International Journal of Systems Science,2016,47(11):2700-2708.
- [5] BAHREINIA M, ZAREIA J. Static-output feedback controller design for a class of nonlinear networked control systems with random delay and data packet dropout[J].Systems Science & Control Engineering,2016,4(1):192-198.
- [6] XIN K F,CAO X H,CHEN J M,et al.Optimal controller location in wireless networked control systems[J].International Journal of Robust and Nonlinear Control,2015,25(2):301-319.
- [7] WANG M,WANG M,QIN J B,et al.Robust exponential stabilization for sampled-data systems with variable sampling and packet dropouts[J].Circuits,Systems, and Signal Processing,2016,35(10):3482-3505.
- [8] 唐子蛟,蔡乐才,符长友.异构网络环境中的拥塞丢包率仿真分析[J].四川理工学院学报:自然科学版,2013,26(5):31-34.
- [9] 邓玮璋,费敏锐.一类时变无线网络控制系统分析与仿真研究[J].系统仿真学报,2016,28(8):1878-1883.
- [10] 廖勇,代学武,周昕.基于特征根优化的无线网络控制系统故障检测滤波器设计[J].电子学报,2015,43(6):1236-1240.
- [11] DENG W H,FEI M R,LI K.A novel approach to stabilize a class of heterogeneous networked control systems[C]//2011 International Conference on Modeling,Identification and Control,Shanghai,June 26-29,2011:567-571.
- [12] YANG W,LIU M,SHI P.  $H_{\infty}$  filtering for nonlinear stochastic systems with sensor saturation, quantization and random packet losses[J].Signal Processing,2012,92(6):1387-1396.
- [13] YANG L,GUAN C,LUO X.Analysis and design of wireless networked adaptive coded modulation[J].Acta Automatica Sinica,2009,35(7):911-918.
- [14] REZAEI H,MAHBOOBI E R,FARS M.Robust filtering for uncertain networked systems with randomly delayed and lost measurements[J].IET Signal Processing,2015,9(4):320-327.
- [15] SAHEBSARA M,CHEN T,SHAH S L.Optimal  $H_{\infty}$  filtering in networked control systems with multiple packet dropout[J].Systems &Control Letters,2008,57(9):696-702.
- [16] 杜大军,宋志华,费敏锐.受复杂多通道通信约束的网络化系统  $H_2/H_{\infty}$  滤波[J].控制与决策,2014,29(7):1167-1173.

## $H_{\infty}$ Filtering Design for Wireless Networked Control Systems with Multiple Packet Dropout

MA Yunqiang<sup>1,2</sup>, WU Changjun<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China; 2. Department of Electrical Engineering, Anhui Technical College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** The method of  $H_{\infty}$  filtering for wireless networked control systems is introduced to solve the problem of the different multiple packet dropout rate and noise interference, and to improve the stability and robustness of wireless networked control systems. First of all, the multiple packet dropouts are modeled by a Bernoulli random sequence and the packet dropout date in each channel is transformed into stochastic parameter of filtering error system, and then the problem of stochastic parameter of filtering is transformed into the  $H_{\infty}$  performance index of filtering error system with stochastic parameter. Based on this, the sufficient condition for the existence of the  $H_{\infty}$  filters are provided in terms of LMIs. The designed filter can guarantee a prescribed  $H_{\infty}$  performance  $\gamma$  for filtering error system with all energy bounded noise interference signals. Finally, an example is given to illustrate the effectiveness of the designed filter.

**Key words:** wireless networked control systems;  $H_{\infty}$  filtering; multiple packet dropout; stochastic parameter