第 24 卷 第 12 期 控 制 与 决 策 2009 年 12 月
Vol. 24 No. 12 Control and Decision Dec. 2009

文章编号：1001-0920(2009)12-1865-04

一类丢包时延网络控制系统的鲁棒 H_∞ 滤波

张 皓[1]，严怀成[2]，刘 涛[1]，陈启军[1]
(1.同济大学 控制科学与工程系，上海 200092；2.香港中文大学 电子工程学系，香港)

摘 要：用随机马尔可夫跳变系统描述一类具有丢包时延的网络控制系统.为这类网络控制系统设计马尔可夫跳变滤波器，保证了滤波误差系统均方意义下随机渐近稳定，且噪声信号对估计误差的影响低于指定 H_∞ 性能水平，滤波器参数可通过求解线性矩阵不等式得到.最后通过仿真实例验证了所得结论的正确性和滤波器设计方法的有效性.

关键词：H_∞ 滤波；网络控制系统；线性矩阵不等式；马尔可夫跳变系统；时延
中图分类号：TP13 **文献标识码**：A

Robust H_∞ filtering for networked control systems with data packet dropout and delays

ZHANG Hao[1], *YAN Huai-cheng*[2], *LIU Tao*[1], *CHEN Qi-jun*[1]
(1. Department of Control Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Electronic Engineering, The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China. Correspondent: ZHANG Hao, E-mail: zhang_hao@mail.tongji.edu.cn)

Abstract: The stochastic Markov jump system is established to describe a class of networked control systems (NCSs) with time-delay and data packet dropout. A Markov jump filter is designed to ensure asymptotic mean-square stability of the filtering error system, which guarantees a prescribed gain level from the noise signals to the estimation error. The desired filter can be constructed by solving a set of linear matrix inequalities. A simulation example shows the effectiveness of the proposed approach.

Key words: H_∞ filtering; Networked control systems; Linear matrix inequalities; Markov jump systems; Time-delay

1 引 言

状态估计对于控制策略有着重要作用，过去的几十年中，人们在不考虑网络环境影响的情况下，提出了一些有效的滤波器的设计方法[1-3].切换系统在很多实际工程中经常遇到，如飞机的多工作点切换控制和电力系统网络的切换等.关于切换系统的研究已有很多重要结果[4,5]，而对于切换系统滤波问题的研究，目前已经成为研究热点[6,7].将网络的概念引入控制系统的研究中，不可避免地要受到网络通讯带宽的限制.信号的传输会带有网络的特性，比如随机延迟、丢包等[8,9]，这些都给滤波器的设计带来了困难[10,11].

本文将具有时延和丢包现象的网络控制系统建模为一类具有时延和随机扰动的 Markov 跳变系统，并对这类连续网络的 H_∞ 滤波问题进行讨论，给出了简单可行的滤波器设计方法，滤波器增益可通过解一系列线性矩阵不等式得到.所设计出的 Markov 跳变线性滤波器，可以保证滤波误差系统均方意义下随机渐近稳定，并且噪声信号对估计误差的影响小于指定的水平.

2 问题描述

具有时延和丢包的网络控制系统结构如图1所示.其中：τ_{sc} 表示从传感器到控制器的时延，τ_{ca} 为控制器到执行器的时延.切换开关 S 表示 NCSs 的状态.控制回路的总时延为 $0 \leqslant \tau = \tau_{sc} + \tau_{ca} \leqslant \bar{\tau}$.当丢包现象存在时，开关打开；当开关闭合时，网络通信正常.开关定义为

$$S = \begin{cases} 1, & S\text{ 闭合，数据包正常传输；} \\ 2, & S\text{ 断开，数据包丢失.} \end{cases}$$

给定概率空间 $\{\Omega, \boldsymbol{F}, P\}$.其中：$\Omega$ 为样本空间，

收稿日期：2008-12-25；**修回日期**：2009-03-11.
基金项目：国际合作项目(2007DFA10600)；国家科技支撑计划项目(2007BAF10B00)；同济大学优秀人才计划项目(0800219081)；教育部科学研究重大项目(306023).
作者简介：张皓(1979—)，女，湖北荆州人，讲师，博士，从事网络控制系统与复杂网络等研究；陈启军(1966—)，男，湖北松滋人，教授，博士生导师，从事机器人控制、智能控制的研究.

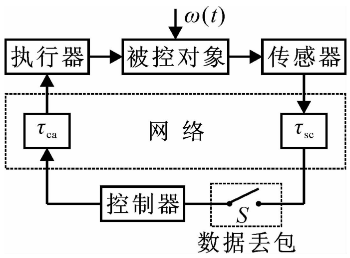

图 1　一类典型的具有丢包时延的 NCSs 结构

$\boldsymbol{F}$ 为样本空间的 σ 代数子集,P 为 $\boldsymbol{F}$ 上的测量概率. $\{r(t), t\geqslant 0\}$ 是定义在概率空间 $\{\Omega,\boldsymbol{F},P\}$ 上的连续时间 Markov 链,在有限模态集 $S=\{1,2\}$ 中取值,具有生成元 $\Lambda=(\pi_{ij})_{i,j\in S}$. 在时刻 $t+\Delta t$ 从模态 i 转移到模态 j 的概率为

$$\Pr\{r(t+\Delta t)=j\mid r(t)=i\}=\begin{cases}\pi_{ij}\Delta t+o(\Delta t),\ i\neq j;\\ 1+\pi_{ii}\Delta t+o(\Delta t),\ i=j.\end{cases}\tag{1}$$

其中:$\Delta t>0, \lim\limits_{\Delta t\to 0} o(\Delta t)/\Delta t=0$. 转移概率满足如下关系:

$$\pi_{ij}\geqslant 0,\ i\neq j, \pi_{ii}<0,$$

$$\sum_{j=1,j\neq i}^{N}\pi_{ij}=-\pi_{ii},\ i,j\in S.$$

不失一般性,假设具有丢包、时延以及外部干扰的 NCSs 表示为

$$\begin{cases}\dot{x}(t)=\\ A(r(t))x(t)+A_d(r(t))x(t-\tau(r(t)))+\\ B(r(t))\omega(t),\ t\geqslant 0,\\ y(t)=\\ C(r(t))x(t)+C_d(r(t))x(t-\tau(r(t)))+\\ D(r(t))\omega(t),\\ z(t)=L(r(t))x(t),\\ x(t)=\phi(t),\ r(t)=r_0,\ t\in[-\bar{\tau},0].\end{cases}\tag{2}$$

其中:$x(t)\in R^n$ 为系统的状态变量;$\omega(t)\in R^p$ 为扰动信号,属于 $L_2[0,\infty)$,$L_2[0,\infty)$ 是在$[0,\infty)$ 上的均方可积函数的空间;$y(t)\in R^q$ 为测量变量;$z(t)\in R^m$ 为待估计信号;$A(r(t))$,$A_d(r(t))$,$B(r(t))$,$C(r(t))$,$C_d(r(t))$,$L(r(t))$,$D(r(t))$ 为具有合适维数的已知矩阵;$\tau(i)$ 为系统在模式 i 下的时延,满足 $0\leqslant\tau\leqslant\bar{\tau}=\max\{\tau(i), i\in S\}$;$\phi(t)$ 为定义在$[-\bar{\tau},0]$ 以及 $r_0\in S$ 上的初始值向量. 为了简单起见,当 $r_k=i\in S$ 时,记 $A(r(t))$ 为 $A_i(t)$,$\lambda=\max\{|\pi_{ii}|, i\in S\}$,$\bar{\tau}=\max\{\tau_i, i\in S\}$,$\underline{\tau}=\min\{\tau_i, i\in S\}$.

定义 1　当 $\omega(t)=0$ 时,对于任意定义在$[-\bar{\tau},0]$ 上的初始向量 $\phi(t)$,初始模式 $r(t)=r_0$,如果存在正常数,$\rho_0(\phi(\cdot),\bar{\tau},r_0)>0$,且 $\rho_0(0,\bar{\tau},r_0)=0$,使得

$$\lim_{N\to\infty}\left\{\int_0^N \mathrm{E}\,\|x(t,\phi,r_0)\|^2\mathrm{d}t\right\}\leqslant\rho_0(\phi,r_0)\tag{3}$$

成立,则 Markov 跳变系统(2) 均方意义下随机渐近稳定. 其中 $\mathrm{E}\{\cdot\}$ 表示数学期望.

定义 2　系统(2) 是均方意义下随机渐近稳定且对于给定正常数 $\gamma>0$,$\omega(t)\in L_2[0,\infty]$,系统(2) 和滤波器(5) 产生的滤波误差系统(11) 满足

$$\mathrm{E}\left\{\int_0^\infty(\|z-\hat{z}\|^2-\gamma^2\|\omega(t)\|^2)\mathrm{d}t\right\}<\beta(e(0)),\tag{4}$$

则滤波误差系统是均方意义下鲁棒随机渐近稳定的. 其中 β 为非负无穷函数,满足 $\beta(0)=0$.

本文的目标在于通过 Markov 线性滤波器得到 $z(t)$ 的观测值 $\hat{z}(t)$,并且该滤波器可保证对于任意非零扰动 $\omega(t)\in L_2[0,\infty)$,观测误差 $z(t)-\hat{z}(t)$ 很小. n 维 Markov 滤波器如下:

$$\begin{cases}\dot{\hat{x}}(t)=A_{fi}\hat{x}(t)+B_{fi}y(t),\\ \hat{z}(t)=L_i\hat{x}(t).\end{cases}\tag{5}$$

其中:$\hat{x}(t)\in R^n$,$\hat{z}(t)\in R^q$,A_{fi} 和 B_{fi} 为待求参数矩阵.

3　主要结论

下面给出鲁棒 H_∞ 滤波器存在的充分条件. 在给出定理前,先给出如下引理:

引理 1[12]　对于任意 $a\in R^{n_a}$,$b\in R^{n_b}$,$N\in R^{n_a\times n_b}$,$X\in R^{n_a\times n_a}$,$Y\in R^{n_a\times n_b}$,$Z\in R^{n_b\times n_b}$,有

$$-2a^{\mathrm{T}}Nb\leqslant\begin{bmatrix}a\\ b\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}X & Y-N\\ * & Z\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a\\ b\end{bmatrix},$$

其中$\begin{bmatrix}X & Y\\ * & Z\end{bmatrix}\geqslant 0$.

定理 1　系统(2) 是均方意义下随机渐近稳定的,如果存在矩阵 $P_i>0, i=1,\cdots,N, S_1>0, Z>0, X, Y$ 满足下列 LMIs:

$$\Pi_i=\begin{bmatrix}\Pi_{11} & P_iA_{di}-Y+\bar{\tau}A_i^{\mathrm{T}}ZA_{di}\\ * & -S_1+\bar{\tau}A_{di}^{\mathrm{T}}ZA_{di}\end{bmatrix}<0,\tag{6}$$

$$\begin{bmatrix}X & Y\\ * & Z\end{bmatrix}\geqslant 0,\tag{7}$$

其中

$$\Pi_{11}=\\ A_i^{\mathrm{T}}P_i+P_iA_i+\tau_iX+Y+Y^{\mathrm{T}}+\\ \sum_{l=1}^{N}\pi_{il}P_l+S_l+\lambda(\bar{\tau}-\underline{\tau})S_1+\bar{\tau}A_i^{\mathrm{T}}ZA_i.$$

证明　当 $\omega(t)=0$ 时,对于式(2),考虑 Lyapunov 函数

$$V(t,x(t))=V_1+V_2+V_3+V_4.$$

其中

$$V_1=x^{\mathrm{T}}(t)P(r(t))x(t),$$

$$V_2=\int_{-\tau(r(t))}^{t}x^{\mathrm{T}}(s)S_1x(s)\mathrm{d}s,$$

$$V_3 = \lambda\int_{-\bar{\tau}}^{-\underline{\tau}}\mathrm{d}\theta\int_{t+\theta}^{t} x^{\mathrm{T}}(s)S_1x(s)\mathrm{d}s,$$

$$V_4 = \int_{-\bar{\tau}}^{0}\int_{\theta+t}^{t}\dot{x}^{\mathrm{T}}(s)Z\dot{x}(s)\mathrm{d}s\mathrm{d}\theta.$$

因为

$$x(t-\tau_i) = x(t) - \int_{t-\tau_i}^{t}\dot{x}(s)\mathrm{d}s, \tag{8}$$

根据 Itô 规则，对 Lyapunov 函数沿系统(2) 的解轨线求弱无穷小算子，得

$$\begin{aligned}
&LV_1 \leqslant \\
&x^{\mathrm{T}}(t)\Big(A_i^{\mathrm{T}}P_i + P_iA_i + \tau_iX + \\
&Y + Y^{\mathrm{T}} + \sum_{l=1}^{N}\pi_{il}P_l\Big)x(t) + \\
&2x^{\mathrm{T}}(t)(P_iA_{di} - Y)x(t-\tau_i) + \\
&\int_{t-\bar{\tau}}^{t}\dot{x}^{\mathrm{T}}(s)Z\dot{x}(s)\mathrm{d}s,\\
&LV_2 < \\
&x^{\mathrm{T}}(t)S_1x(t) - x^{\mathrm{T}}(t-\tau_i)S_1x(t-\tau_i) + \\
&\lambda\int_{t-\bar{\tau}}^{t}x^{\mathrm{T}}(s)S_1x(s)\mathrm{d}s,\\
&LV_3 = \\
&\lambda(\bar{\tau}-\underline{\tau})x^{\mathrm{T}}(s)S_1x(s) - \\
&\lambda\int_{t-\bar{\tau}}^{t}x^{\mathrm{T}}(s)S_1x(s)\mathrm{d}s,\\
&LV_4 = \\
&\bar{\tau}x^{\mathrm{T}}(t)A_i^{\mathrm{T}}ZA_ix(t) + \\
&2\bar{\tau}x^{\mathrm{T}}(t)A_i^{\mathrm{T}}ZA_{di}x(t-\tau_i) + \\
&\bar{\tau}x^{\mathrm{T}}(t-\tau_i)A_{di}^{\mathrm{T}}ZA_{di}x(t-\tau_i) - \\
&\int_{t-\bar{\tau}}^{t}\dot{x}^{\mathrm{T}}(s)Z\dot{x}(s)\mathrm{d}s.
\end{aligned}$$

其中 LV_1 可通过使用引理 1 求得. 则有

$$\begin{aligned}
&LV(x(t)) = \\
&LV_1 + LV_2 + LV_3 + LV_4 \leqslant \\
&\begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau_i)\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\Pi_i\begin{bmatrix} x(t) \\ x(t-\tau_i)\end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

根据定理 1，如果不等式(6) 和(7) 成立，则当 $t>0$ 时，$LV < \lambda_{\max}(\Pi_i)\,\|\xi(t)\|_2^2 < 0, i = 1,\cdots,N$. 其中 $\xi^{\mathrm{T}}(t) = [x^{\mathrm{T}}(t), x^{\mathrm{T}}(t-\tau_i)]$. 根据定义 1，采用与文献[7,8] 相似的证明方法，可以得到不等式(3) 成立. 详细证明过程略. □

定理 2　考虑系统(2)，对于给定的常数 $\gamma > 0$，存在 Markov 线性滤波器(5) 使得滤波误差系统均方意义下鲁棒随机渐近稳定，如果存在正定矩阵 P_{1i}, P_{2i}, S_1，矩阵 $X, Y, Z, M_i, N_i, i = 1,\cdots,N$，使得不等式(7) 以及如下不等式成立：

$$\begin{bmatrix}
\Sigma_{11} & \Sigma_{12} & P_{1i}B_i & P_{1i}A_{di} - Y^{\mathrm{T}} & \sqrt{\bar{\tau}}A_i^{\mathrm{T}}Z \\
* & \Sigma_{22} & \Sigma_{23} & P_{2i}A_{di} - N_i^{\mathrm{T}}C_{di} & 0 \\
* & * & -\gamma^2 I & 0 & 0 \\
* & * & * & -S_1 & \sqrt{\bar{\tau}}A_{di}^{\mathrm{T}}Z \\
* & * & * & * & -Z
\end{bmatrix} < 0. \tag{9}$$

其中

$$\begin{aligned}
&\Sigma_{11} = \\
&A_i^{\mathrm{T}}P_{1i} + P_{1i}A_i + \tau_iX + Y + Y^{\mathrm{T}} + \\
&\sum_{l=1}^{N}\pi_{il}P_{1l} + S_1 + \lambda(\bar{\tau}-\underline{\tau})S_1,\\
&\Sigma_{12} = A_i^{\mathrm{T}}P_{2i} - M_i - C_i^{\mathrm{T}}N_i,\\
&\Sigma_{22} = M_i + M_i^{\mathrm{T}} + \sum_{l=1}^{N}\pi_{il}P_{2l} + L_i^{\mathrm{T}}L_i,\\
&\Sigma_{23} = P_{2i}B_i - N_i^{\mathrm{T}}D_i.
\end{aligned}$$

滤波器参数设计为

$$A_{fi} = P_{2i}^{-1}M_i^{\mathrm{T}},\ B_{fi} = P_{2i}^{-1}N_i^{\mathrm{T}}. \tag{10}$$

证明　令 $\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t)$，由系统(2) 和(5) 得，对于任意 $i \in S$ 有

$$\begin{aligned}
&\dot{\tilde{x}}(t) = \\
&A_{fi}\tilde{x}(t) + [A_i - A_{fi} - B_{fi}C_i]x(t) + \\
&[A_{di} - B_{fi}C_{di}]x(t-\tau_i) + [B_i - B_{fi}D_i]\omega(t).
\end{aligned}$$

定义 $e(t) = [x^{\mathrm{T}}(t), \tilde{x}^{\mathrm{T}}(t)]^{\mathrm{T}}$，$\tilde{z}(t) = z(t) - \hat{z}(t)$，则滤波误差系统为

$$\begin{cases}
\dot{e}(t) = \tilde{A}_ie(t) + \tilde{A}_{di}He(t-\tau_i) + \tilde{B}_i\omega(t),\\
\tilde{z}(t) = \tilde{L}_ie(t).
\end{cases} \tag{11}$$

其中

$$\begin{aligned}
&\tilde{A}_i = \begin{bmatrix} A_i & 0 \\ A_i - A_{fi} - B_{fi}C_i & A_{fi}\end{bmatrix},\\
&\tilde{A}_{di} = \begin{bmatrix} A_{di} \\ A_{di} - B_{fi}C_{di}\end{bmatrix},\ H = [I \quad 0],\\
&\tilde{B}_i = \begin{bmatrix} B_i \\ B_i - B_{fi}D_i\end{bmatrix},\ \tilde{L}_i = [0 \quad L_i].
\end{aligned} \tag{12}$$

当 $\omega(t) = 0$ 时，将定理 1 中 A_i 用 $\tilde{A}_i$ 替代；A_{di} 用 $\tilde{A}_{di}H$ 替代；P_i 用 $\tilde{P}_i$ 替代，$\tilde{P}_i = \mathrm{diag}\{P_{1i}, P_{2i}\}$；$X, Y, Z, S_1$ 分别用 $\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z}, \tilde{S}_1$ 替代，且 $\tilde{X}, \tilde{Y}, \tilde{Z}, \tilde{S}_1$ 分别等于 $H^{\mathrm{T}}XH, H^{\mathrm{T}}YH, H^{\mathrm{T}}ZH, H^{\mathrm{T}}S_1H$. 则得到滤波误差系统(11) 均方意义下随机渐近稳定条件为不等式(7) 以及

$$\begin{bmatrix}
\tilde{\Pi}_{11} & \tilde{P}_i\tilde{A}_{di}H - \tilde{Y} + \bar{\tau}\tilde{A}_i^{\mathrm{T}}\tilde{Z}\tilde{A}_{di}H \\
* & -\tilde{S}_1 + \bar{\tau}H^{\mathrm{T}}A_{di}^{\mathrm{T}}\tilde{Z}A_{di}H
\end{bmatrix} < 0. \tag{13}$$

其中

$$\Pi_{11} = \tilde{A}_i^{\mathrm{T}}\tilde{P}_i + \tilde{P}_i\tilde{A}_i + \tau_i\tilde{X} + \tilde{Y} + \tilde{Y}^{\mathrm{T}} +$$

$$\sum_{l=1}^{N}\pi_{il}\tilde{P}_l+\tilde{S}_1+\lambda(\bar{\tau}-\underline{\tau})\tilde{S}_1+\bar{\tau}\tilde{A}_i^{\mathrm{T}}\tilde{Z}\tilde{A}_i.$$

当 $\omega(t)\neq 0$ 时，考虑滤波误差系统鲁棒 H_∞ 随机稳定性，定义 Lyapunov 函数为

$$\begin{aligned}&V(e(t))=\\&e^{\mathrm{T}}(t)\tilde{P}_ie(t)+\int_{t-\tau(r(t))}^{t}e^{\mathrm{T}}(s)\tilde{S}_1e(s)\mathrm{d}s+\\&\lambda\int_{-\bar{\tau}}^{-\underline{\tau}}\mathrm{d}\theta\int_{t+\theta}^{t}e^{\mathrm{T}}(s)\tilde{S}_1e(s)\mathrm{d}s+\\&\int_{-\bar{\tau}}^{0}\int_{\theta+t}^{t}\dot{e}^{\mathrm{T}}(s)\tilde{Z}\dot{e}(s)\mathrm{d}s\mathrm{d}\theta,\end{aligned}$$

则有

$$\begin{aligned}&LV(e(t))+\tilde{z}^{\mathrm{T}}(t)\tilde{z}(t)-\gamma^2\omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t)\leqslant\\&\zeta^{\mathrm{T}}(t)\Xi_i\zeta(t).\end{aligned}\tag{14}$$

其中

$$\zeta^{\mathrm{T}}(t)=[e^{\mathrm{T}}(t)\quad \omega^{\mathrm{T}}(t)\quad e^{\mathrm{T}}(t-\tau_i)],$$

$$\Xi_i=\begin{bmatrix}\Xi_{11} & \tilde{P}_i\tilde{B}_i & \tilde{P}_i\tilde{A}_{di}H-\tilde{Y}+\bar{\tau}\tilde{A}_i^{\mathrm{T}}\tilde{Z}\tilde{A}_{di}H\\ * & -\gamma^2 I & 0\\ * & * & -\tilde{S}_1+\bar{\tau}H^{\mathrm{T}}\tilde{A}_{di}^{\mathrm{T}}\tilde{Z}\tilde{A}_{di}H\end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}&\Xi_{11}=\\&\tilde{A}_i^{\mathrm{T}}\tilde{P}_i+\tilde{P}_i\tilde{A}_i+\tau_i\tilde{X}+\tilde{Y}+\tilde{Y}^{\mathrm{T}}+\\&\sum_{l=1}^{N}\pi_{il}\tilde{P}_l+\tilde{S}_1+\lambda(\bar{\tau}-\underline{\tau})\tilde{S}_1+\bar{\tau}\tilde{A}_i^{\mathrm{T}}\tilde{Z}\tilde{A}_i+\tilde{L}_i^{\mathrm{T}}\tilde{L}_i.\end{aligned}$$

将 $\tilde{A}_i,\tilde{A}_{di},\tilde{B}_i,\tilde{L}_i$ 分别用式(12)替换，使用 Schur 补，得到 $\Xi_i<0$ 等价于式(9). 根据定理 1，如果不等式(7)和(9)成立，则结合不等式(14)，有

$$LV+\tilde{z}^{\mathrm{T}}(t)\tilde{z}(t)-\gamma^2\omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t)<0.$$

对上述不等式两边从 0 到 T 积分，$T>0$，求期望得

$$\begin{aligned}&\mathrm{E}\left\{\int_0^T[LV(e(t))+\tilde{z}^{\mathrm{T}}(t)\tilde{z}(t)-\gamma^2\omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t)]\mathrm{d}t\right\}=\\&\mathrm{E}\left\{\int_0^T[\tilde{z}^{\mathrm{T}}(t)\tilde{z}(t)-\gamma^2\omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t)]\mathrm{d}t\right\}+\\&\mathrm{E}\{V(e(T))\}-V(e(0))<0.\end{aligned}\tag{15}$$

因为滤波误差系统均方意义下随机稳定，所以当 $T\to\infty$ 时，$\mathrm{E}\{V(e(T))\}=0$，结合不等式(15)，得

$$\begin{aligned}&\mathrm{E}\left\{\int_0^T[\tilde{z}^{\mathrm{T}}(t)\tilde{z}(t)-\gamma^2\omega^{\mathrm{T}}(t)\omega(t)]\mathrm{d}t\right\}<\\&V(e(0)).\end{aligned}$$ □

推论 1 如果 $S=\{1\}$，即跳变系统只有一个模式，则系统(2)退化为一个受随机扰动的定常时延系统，相应的滤波器也变为线性滤波器.

4 仿真研究

考虑系统在两个模式下切换，$S=\{1,2\}$，系统参数为

$$A_1=\begin{bmatrix}-0.5 & -1\\ 0 & -3\end{bmatrix},\ A_{d1}=\begin{bmatrix}-0.5 & -0.2\\ 0.2 & 0.3\end{bmatrix},$$

$$A_2=\begin{bmatrix}-5 & 1\\ 1 & 0.2\end{bmatrix},\ A_{d2}=\begin{bmatrix}-0.3 & 0.5\\ 0.4 & -0.5\end{bmatrix},$$

$$B_1=\begin{bmatrix}1\\ 0.4\end{bmatrix},\ B_2=\begin{bmatrix}0.5\\ 1\end{bmatrix},$$

$$C_1=[1\quad 0.5],\ C_{d1}=[1\quad 0.5],$$

$$C_2=[0.1\quad 1],\ C_{d2}=[1\quad 0.2],$$

$$L_1=L_2=[0.1\quad 1],\ D_1=D_2=0.1,$$

$$\bar{\tau}=0.2,\ \underline{\tau}=0.1.$$

本文假设指定的性能指标 $\gamma=1.0$. 根据定理 2，并通过 Matlab LMI 工具箱求解，可以得到待设计的滤波器参数为

$$A_{f1}=\begin{bmatrix}-0.0172 & -2.2871\\ -2.0365 & -8.4139\end{bmatrix},$$

$$A_{f2}=\begin{bmatrix}-8.3804 & 0.7275\\ -0.0951 & -4.0500\end{bmatrix},$$

$$B_{f1}=\begin{bmatrix}0.4015\\ 3.4352\end{bmatrix},\ B_{f2}=\begin{bmatrix}1.0587\\ 3.2538\end{bmatrix}.$$

可见，滤波器参数可通过一系列 LMIs 解出，而且该方法是有效而实用的.

5 结 论

本文采用一类 Markov 切换系统对具有时延、丢包网络控制系统建模，设计切换滤波器对网络控制系统进行观测. 给出了简单可行的切换滤波器设计方法，观测器可通过一系列 LMIs 求出. 所设计的 Markov 跳变线性滤波器，可保证滤波误差系统均方意义下随机渐近稳定，且噪声信号对估计误差的影响保持在指定的水平上.

参考文献(References)

[1] 高会军，王常虹. 不确定连续系统的鲁棒 L_2-L_∞ 滤波新方法[J]. 自动化学报，2003，29(6)：809-814.
(Gao H J, Wang C H. New approach to robust L_2-L_∞ filter design for uncertain continuous time systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(6): 809-814.)

[2] 高会军，王常虹，李艳辉. 时延不确定离散系统的鲁棒 L_2-L_∞ 滤波[J]. 自动化学报，2003，29(5)：666-672.
(Gao H J, Wang C H, Li Y H. Robust L_2-L_∞ filter design for uncertain discrete-time state-delayed systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(5): 666-672.)

[3] Xu S Y, Chen T W, Lam J. Robust H_∞ filtering for uncertain Markovian jump systems with mode-dependent time delays[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(5): 900-907.

[4] Sun Z D, Ge S S. Analysis and synthesis of switched linear control system[J]. Automatica, 2005, 41(2): 181-195.

(下转第 1872 页)