文章编号: 1000−8152(2007)06−0919−05

部分测量数据丢失的网络化系统的l_2-l_∞滤波

王 武, 蔡逢煌, 林琼斌, 杨富文

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 在网络系统中, 滤波器得到的观测量通过有限带宽的通道进行传送可能发生丢失. 本文研究一类具有测量数据部分丢失的网络化系统的l_2-l_∞滤波器设计问题. 测量数据的丢失采用已知概率分布的二进制切换序列来描述. 利用线性矩阵不等式方法, 设计全阶和降阶滤波器. 所设计的滤波器使得滤波误差系统均方指数稳定, 而且保证相对于所有有界的外界扰动信号, 滤波误差系统具有一定的l_2-l_∞扰动衰减水平. 数字仿真表明设计方法的有效性.

关键词: 数据丢失; 网络化系统; 滤波; l_2-l_∞性能; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

l_2-l_∞ filtering for networked systems with missing measurements

WANG Wu, CAI Feng-huang, LIN Qiong-bin, YANG Fu-wen

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou Fujian 350108, China)

Abstract: In networked systems, observation data transmitted to the estimator through limited bandwidth channels may be lost. The problem of l_2-l_∞ filter design is addressed for networked systems with missing measurements. The missing measurements are described by a binary switching sequence satisfying a conditional probability distribution. The main purpose is to obtain both full- and reduced-order filters such that the filter error systems are exponentially mean-square stable and guarantee a prescribed energy-to-peak disturbance attenuation level in term of linear matrix inequalities (LMIs). An illustrative numerical example is provided to demonstrate the usefulness and flexibility of the proposed design approach.

Key words: missing data; networked system; filtering; energy-to-peak performance; LMI

1 引言(Introduction)

在状态估计中, 测量数据的准确性对状态估计质量起决定性作用. 然而, 数据在网络中传输时由于受到网络带宽的限制等原因可能造成测量数据的部分丢失, 导致滤波器获得的测量信息仅含干扰噪声信号, 而丢失了重要的对象输出信息, 这将使得滤波性能下降.

对于测量数据可以完全获得的系统(即完全信息系统), 滤波器设计理论与设计方法在过去几十年里取得了很多的成果[1]. 目前, 国内外学者也开始对测量数据丢失系统的滤波进行了研究. 特别是近几年网络技术的飞速发展, 对这类系统的研究愈加迫切. 现有对数据丢失的处理主要有3种方法: 1) 用估计值来取代丢失的数据[2]; 2) 把丢失数据当做“零”数据处理, 采用不完全矩阵来描述丢失的数据[3]; 3) 根据数据丢失的随机性, 将这一类系统描述为随机系统, 主要是采用Bernoulli分布的序列[4,5]和Markov过程[6]来描述数据的丢失.

l_2-l_∞滤波是一种假定系统的噪声输入信号是能量有界的, 使滤波误差系统具有一定的l_2-l_∞扰动衰减水平的滤波方法, 称为能量–峰值滤波. 对完全信息系统的l_2-l_∞滤波器的研究可见文献[7]及其参考文献. 但据作者所知, 对具有测量数据部分丢失系统的l_2-l_∞滤波问题还未见探讨.

本文采用满足Bernoulli分布的序列来描述数据的丢失, 研究一类具有测量数据部分丢失的网络化系统的l_2-l_∞滤波器设计问题. 运用LMI方法, 给出了全阶和降阶滤波器存在的充分条件, 所设计的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.

2 问题的描述(Problem formulation)

考虑如下网络化系统:

$$\begin{cases} x(k+1)=Ax(k)+Bw(k), \\ y(k)=r(k)Cx(k)+Dw(k),\ z(k)=Lx(k). \end{cases} \tag{1}$$

收稿日期: 2006−06−19; 收修改稿日期: 2006−12−28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60474049, 60604027); 福建省自然科学基金资助项目(A0410012, A0510009, 2007J0018).

其中: $x(k)\in\mathbb{R}^n$是状态向量; $w(k)\in\mathbb{R}^m$是外部扰动, 属于$l_2[0,\infty)$; $y(k)\in\mathbb{R}^r$是测量输出向量, $z(k)\in\mathbb{R}^p$是被估计状态; A,B,C,D,L是已知的实矩阵; 随机变量$r(k)\in\mathbb{R}$是一个满足Bernoulli分布的序列, 其取值为0和1. 它的概率为

$$\mathrm{Prob}\{r(k)=1\}=\mathrm{E}\{r(k)\}:=\bar{r}, \tag{2}$$

$$\mathrm{Prob}\{r(k)=0\}=1-\mathrm{E}\{r(k)\}:=1-\bar{r}. \tag{3}$$

其中$\bar{r}$是已知的正数.

注 1 测量数据的丢失是通过随机变量$r(k)$来描述的. 当$r(k)=1$时, 测量数据中包含被控对象输出信息; 当$r(k)=0$时, 测量数据中仅含噪声信号.

设计的k阶滤波器为

$$\begin{cases}\hat{x}(k+1)=A_f\hat{x}(k)+B_fy(k),\\ \hat{z}(k)=C_f\hat{x}(k).\end{cases} \tag{4}$$

其中: $\hat{x}(k)\in\mathbb{R}^k$表示状态估计, A_f,B_f,C_f是要设计的滤波器参数. 当$k=n$时设计的滤波器是全阶滤波器, 当$1\leqslant k<n$是降阶滤波器.

根据式(1)和式(4), 可以得到如下增广系统:

$$\begin{cases}x_{cl}(k+1)=A_{cl}x_{cl}(k)+B_{cl}w(k),\\ e(k)=C_{cl}x_{cl}(k).\end{cases} \tag{5}$$

其中:

$$x_{cl}(k)=\begin{bmatrix}x(k)\\ \hat{x}(k)\end{bmatrix},\ e(k)=z(k)-\hat{z}(k),$$

$$A_{cl}=\begin{bmatrix}A & 0\\ r(k)B_fC & A_f\end{bmatrix}=A_{cl0}+(r(k)-\bar{r})A_{cl1},$$

$$B_{cl}=\begin{bmatrix}B\\ B_fD\end{bmatrix},\ C_{cl}=\begin{bmatrix}L & -C_f\end{bmatrix},$$

$$A_{cl0}=\begin{bmatrix}A & 0\\ \bar{r}B_fC & A_f\end{bmatrix},\ A_{cl1}=\begin{bmatrix}0 & 0\\ B_fC & 0\end{bmatrix}.$$

本文的目标是设计形如式(4)的全阶和降阶的滤波器, 使得

1) 在外部扰动 $w(k)=0$ 情况下, 滤波误差系统(5)是均方指数稳定的.

2) 在零初始条件下, 滤波误差系统(5)具有l_2-l_∞性能$\gamma(\gamma>0)$, 即

$$\mathrm{E}\{\|e(k)\|_\infty^2\}<\gamma^2\mathrm{E}\{\|w(k)\|_2^2\},\forall w(k)\neq 0, \tag{6}$$

其中:

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

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

引理 1[8] $V(k)=x_{cl}^{\mathrm{T}}(k)Px_{cl}(k)$为Lyapunov函数. 如果存在实数$\lambda\geqslant 0,\mu>0,\upsilon>0$和$0<\psi<1$使得

$$\mu\|x_{cl}(k)\|^2\leqslant V(k)\leqslant\nu\|x_{cl}(k)\|^2 \tag{7}$$

和

$$\mathrm{E}\{V(k+1)|V(k)\}-V(k)\leqslant\lambda-\psi V(k), \tag{8}$$

那么有

$$\mathrm{E}\{\|x_{cl}(k)\|^2\}\leqslant\frac{\nu}{\mu}(1-\psi)^k\mathrm{E}\{\|x_{cl}(0)\|^2\}+\frac{\lambda}{\mu\psi}. \tag{9}$$

3 l_2-l_∞滤波分析(l_2-l_∞ filtering analysis)

在本节, 先给出滤波误差系统(5)均方指数稳定的且具有给定的l_2-l_∞性能的充分条件.

定理 1 给定$\gamma>0$. 如果存在正定对称阵P和矩阵A_f,B_f,C_f, 使得

$$\begin{bmatrix}-P & * & * & *\\ 0 & -I & * & *\\ PA_{cl0} & PB_{cl} & -P & *\\ aPA_{cl1} & 0 & 0 & -aP\end{bmatrix}<0, \tag{10}$$

$$\begin{bmatrix}-P & *\\ C_{cl} & -\gamma^2I\end{bmatrix}<0 \tag{11}$$

成立, 其中$a=(1-\bar{r})\bar{r}$, 那么系统(5)是均方指数稳定的且具有给定的l_2-l_∞性能.

证 首先证明系统(5)是均方指数稳定的, 此时令$w(k)=0$.

取Lyapunov函数为

$$V(k)=x_{cl}^{\mathrm{T}}(k)Px_{cl}(k), \tag{12}$$

其中P为正定对称阵. 那么,

$$\begin{aligned}&\Delta V(k)=\mathrm{E}\{V(k+1)|V(k)\}-\mathrm{E}\{V(k)\}=\\ &\mathrm{E}\{(A_{cl}x_{cl}(k))^{\mathrm{T}}P(A_{cl}x_{cl}(k))\}-x_{cl}^{\mathrm{T}}(k)Px_{cl}(k)=\\ &(A_{cl0}x_{cl}(k))^{\mathrm{T}}P(A_{cl0}x_{cl}(k))+2\mathrm{E}\{(r(k)-\\ &\bar{r})x_{cl}^{\mathrm{T}}(k)A_{cl0}^{\mathrm{T}}PA_{cl1}x_{cl}(k)\}+\mathrm{E}\{(r(k)-\\ &\bar{r})^2x_{cl}^{\mathrm{T}}(k)A_{cl1}^{\mathrm{T}}PA_{cl1}x_{cl}(k)\}-x_{cl}^{\mathrm{T}}(k)Px_{cl}(k).\end{aligned} \tag{13}$$

由于

$$\mathrm{E}(r(k)-\bar{r})=0,\ \mathrm{E}(r(k)-\bar{r})^2=(1-\bar{r})\bar{r}:=a,$$

那么有

$$\begin{aligned}\Delta V(k)=\mathrm{E}\{V(k+1)|V(k)\}-\mathrm{E}\{V(k)\}=\\ x_{cl}^{\mathrm{T}}(k)\varLambda x_{cl}(k).\end{aligned} \tag{14}$$

其中$\varLambda=A_{cl0}^{\mathrm{T}}PA_{cl0}+aA_{cl1}^{\mathrm{T}}PA_{cl1}-P$.

由Schur补引理, 式(10)隐含$\varLambda<0$, 因此有

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

$$x_{cl}^{\mathrm{T}}(k)\varLambda x_{cl}(k)\leqslant-\lambda_{\min}(-\varLambda)x_{cl}^{\mathrm{T}}(k)x_{cl}(k)\leqslant$$

$$-\alpha x_{cl}^{\mathrm T}(k)x_{cl}(k). \tag{15}$$

其中$0<\alpha\leqslant\lambda_{\min}(-\Lambda)$.

存在α同时也满足$0<\alpha<\lambda_{\max}(P)$, 那么

$$\begin{aligned}&\mathrm E\{V(k+1)|V(k)\}-\mathrm E\{V(k)\}\leqslant\\&-\alpha V(k)/\lambda_{\max}(P)=-\psi V(k),\end{aligned} \tag{16}$$

可见$0<\psi<1$.

那么由引理1, 有

$$\mathrm E\{\|x_{cl}(k)\|^2\}\leqslant\frac{\lambda_{\max}(P)}{\lambda_{\min}(P)}(1-\psi)^k\mathrm E\{\|x_{cl}(0)\|^2\}, \tag{17}$$

即系统(5)是均方指数稳定的.

定义性能函数为

$$J=\mathrm E\{V(k)\}-\mathrm E\{\sum_{i=0}^{k-1}w^{\mathrm T}(i)w(i)\}. \tag{18}$$

在零初始条件下,

$$\begin{aligned}&J=\mathrm E\{V(k)\}-\mathrm E\{V(0)\}-\mathrm E\{\sum_{i=0}^{k-1}w^{\mathrm T}(i)w(i)\}=\\&\sum_{i=0}^{k-1}(\Delta V(i)-w^{\mathrm T}(i)w(i)).\end{aligned} \tag{19}$$

当$w(k)\neq0$时,

$$\begin{aligned}&\Delta V(k)=\\&x_{cl}^{\mathrm T}(k)\Lambda x_{cl}(k)+2w^{\mathrm T}(k)B_{cl}^{\mathrm T}PA_{cl0}x_{cl}(k)+\\&w^{\mathrm T}(k)B_{cl}^{\mathrm T}PB_{cl}w(k),\end{aligned} \tag{20}$$

那么将式(20)代入式(19), 得

$$\begin{aligned}&J=\sum_{i=0}^{k-1}(\Delta V(i)-w^{\mathrm T}(i)w(i))=\\&\sum_{i=0}^{k-1}(\begin{bmatrix}x_{cl}(i)\\w(i)\end{bmatrix}^{\mathrm T}\begin{bmatrix}\Lambda & *\\B_{cl}^{\mathrm T}PA_{cl0} & B_{cl}^{\mathrm T}PB_{cl}-I\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x_{cl}(i)\\w(i)\end{bmatrix}).\end{aligned} \tag{21}$$

由Schur补引理, 式(10)成立, 那么有$J<0$, 即

$$\mathrm E\{V(k)\}-\mathrm E\{\sum_{i=0}^{k-1}w^{\mathrm T}(i)w(i)\}<0, \tag{22}$$

$$\mathrm E\{x_{cl}^{\mathrm T}(k)Px_{cl}(k)\}<\mathrm E\{\sum_{i=0}^{k-1}w^{\mathrm T}(i)w(i)\}. \tag{23}$$

另外, 式(11)由Schur补引理等价于

$$C_{cl}^{\mathrm T}C_{cl}<\gamma^2P, \tag{24}$$

那么$k>0$时, 有

$$\begin{aligned}&\mathrm E\{e^{\mathrm T}(k)e(k)\}=\\&x_{cl}^{\mathrm T}(k)C_{cl}^{\mathrm T}C_{cl}x_{cl}(k)<\gamma^2x_{cl}^{\mathrm T}(k)Px_{cl}(k)=\\&\gamma^2\mathrm E\{x_{cl}^{\mathrm T}(k)Px_{cl}(k)\}<\gamma^2\mathrm E\{\sum_{i=0}^{k-1}w^{\mathrm T}(i)w(i)\}\leqslant\\&\gamma^2\mathrm E\{\sum_{i=0}^{\infty}w^{\mathrm T}(i)w(i)\}.\end{aligned} \tag{25}$$

由式(25), 显然有

$$\sup_k\{\mathrm E\{e^{\mathrm T}(k)e(k)\}\}<\gamma^2\mathrm E\{\sum_{i=0}^{\infty}w^{\mathrm T}(i)w(i)\}, \tag{26}$$

即

$$\mathrm E\{\|e(k)\|_\infty^2\}<\gamma^2\mathrm E\{\|w(k)\|_2^2\}. \tag{27}$$

证毕.

4 l_2-l_∞滤波器设计(l_2-l_∞ filtering synthesis)

在这一节中, 利用上一节的定理给出全阶滤波器($k=n$)和降阶滤波器($1\leqslant k<n$)的设计方法. 在给出滤波器前, 先给出下面的定理:

定理 2　给定$\gamma>0$. 如果存在正定对称阵P, 矩阵G, A_f, B_f, C_f, 使得

$$\begin{bmatrix}-P & * & * & *\\0 & -I & * & *\\G^{\mathrm T}A_{cl0} & G^{\mathrm T}B_{cl} & P-G-G^{\mathrm T} & *\\aG^{\mathrm T}A_{cl1} & 0 & 0 & a(P-G-G^{\mathrm T})\end{bmatrix}<0, \tag{28}$$

$$\begin{bmatrix}-P & *\\C_{cl} & -\gamma^2I\end{bmatrix}<0 \tag{29}$$

成立, 其中$a=(1-\bar r)\bar r$, 那么系统(5)是均方指数稳定的且具有给定的l_2-l_∞性能.

证　由文献[9]的方法可证得式(28)和式(10)是等价的.　证毕.

定理 3　给定$\gamma>0$. 如果存在正定对称阵P_1和P_3, 矩阵P_2, V_1, V_2, V_3, $\hat A_f$, $\hat B_f$, $\hat C_f$, 使得式(30)和式(31)成立:

$$\begin{bmatrix}-P_1 & * & * & * & * & * & *\\-P_2^{\mathrm T} & -P_3 & * & * & * & * & *\\0 & 0 & -I & * & * & * & *\\V_1^{\mathrm T}A+\bar rE\hat B_fC & E\hat A_f & V_1^{\mathrm T}B+E\hat B_fD & P_1-V_1-V_1^{\mathrm T} & * & * & *\\V_3^{\mathrm T}A+\bar r\hat B_fC & \hat A_f & V_3^{\mathrm T}B+\hat B_fD & P_2^{\mathrm T}-V_3^{\mathrm T}-V_2^{\mathrm T}E^{\mathrm T} & P_3-V_2-V_2^{\mathrm T} & * & *\\aE\hat B_fC & 0 & 0 & 0 & 0 & a(P_1-V_1-V_1^{\mathrm T}) & *\\a\hat B_fC & 0 & 0 & 0 & 0 & a(P_2^{\mathrm T}-V_3^{\mathrm T}-V_2^{\mathrm T}E^{\mathrm T}) & a(P_3-V_2-V_2^{\mathrm T})\end{bmatrix}<0. \tag{30}$$

$$\begin{bmatrix} -P_1 & * & * \\ -P_2^{\mathrm{T}} & -P_3 & * \\ L & -\hat{C}_f & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0. \tag{31}$$

其中: $a=(1-\bar{r})\bar{r}$, $E=\begin{bmatrix} I_{k*k} \\ 0_{(n-k)*k} \end{bmatrix}$, 那么系统(5)是均方指数稳定的且具有给定的$l_2$-$l_\infty$性能. 此时滤波器的参数为

$$A_f=V_2^{-1}\hat{A}_f,\ B_f=V_2^{-1}\hat{B}_f,\ C_f=\hat{C}_f. \tag{32}$$

证 由定理2知, 系统(5)是均方指数稳定的且具有给定的l_2-l_∞性能的充分条件是式(28)和式(29)成立.

采用文献[10]所提出的变量替换法, 即构造矩阵

$$G=\begin{bmatrix} V_1 & V_3 M^{-1} G_{22} \\ M E^{\mathrm{T}} & G_{22} \end{bmatrix}. \tag{33}$$

其中: $E=\begin{bmatrix} I_{k*k} \\ 0_{(n-k)*k} \end{bmatrix}$, $V_1\in\mathbb{R}^{n*n}$, $V_3\in\mathbb{R}^{n*k}$, $M\in\mathbb{R}^{k*k}$, $G_{22}\in\mathbb{R}^{k*k}$. 并令

$$\begin{cases} V_2=M^{\mathrm{T}}G_{22}^{-1}M,\ J=\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & G_{22}^{-1}M \end{bmatrix}, \\ J^{\mathrm{T}}PJ=\begin{bmatrix} P_1 & P_2 \\ P_2^{\mathrm{T}} & P_3 \end{bmatrix}. \end{cases} \tag{34}$$

取变换阵$T_1=\mathrm{diag}\{J,I,J,J\}$, 对式(28)进行合同变换，取变换阵$T_2=\mathrm{diag}\{J,I\}$, 对式(29)进行合同变换, 并令$\hat{A}_f=M^{\mathrm{T}}A_f G_{22}^{-1}M$, $\hat{B}_f=M^{\mathrm{T}}B_f$, $\hat{C}_f=C_f G_{22}^{-1}M$, 即得到式(30)和式(31).

由滤波器传递函数

$$\begin{aligned} T_f &= C_f(zI-A_f)^{-1}B_f= \\ &\hat{C}_f(zM^{\mathrm{T}}G_{22}^{-1}M-\hat{A}_f)^{-1}\hat{B}_f= \\ &\hat{C}_f(zI-V_2^{-1}\hat{A}_f)^{-1}V_2^{-1}\hat{B}_f, \end{aligned} \tag{35}$$

那么可取滤波器的参数为

$$A_f=V_2^{-1}\hat{A}_f,\ B_f=V_2^{-1}\hat{B}_f,\ C_f=\hat{C}_f.$$

证毕.

注 2 滤波器的阶数是矩阵E的列维数k来控制的. 当矩阵E的列维数$k=n$, 即矩阵E为单位阵, 得到的滤波器阶数就是n; 当矩阵E的列维数$1\leqslant k<n$, 那么就可以得到k阶的降阶滤波器.

注 3 该文的方法可以很方便地推广到一类凸多面体不确定系统的l_2-l_∞滤波器设计. 假设系统(1) 的系统矩阵A, B, C, D, L均为不确定矩阵, 假设可以表达为若干个顶点矩阵的凸组合, 即

$$\begin{aligned} &M=(A,B,C,D,L)\in\Omega, \\ &\Omega=\{(A,B,C,D,L)|(A,B,C,D,L)= \\ &\sum_{i=1}^{S}\tau_i(A_i,B_i,C_i,D_i,L_i),\ \tau_i\geq 0,\ \sum_{i=1}^{S}\tau_i=1\}. \end{aligned} \tag{36}$$

那么有以下的推论:

推论 1 给定$\gamma>0$. 对于系统(1)其系统矩阵满足式(36), 存在滤波器(4)使得增广系统是均方指数稳定的且具有给定的l_2-l_∞性能的充分条件是存在正定对称阵P_{1i} 和P_{3i}, 矩阵P_{2i}, V_1, V_2, V_3, $\hat{A}_f$, $\hat{B}_f$, $\hat{C}_f$, 使得式(37)和式(38)成立:

$$\begin{bmatrix} -P_{1i} & * & * & * & * & * & * \\ -P_{2i}^{\mathrm{T}} & -P_{3i} & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -I & * & * & * & * \\ V_1^{\mathrm{T}}A_i+\bar{r}E\hat{B}_fC_i & E\hat{A}_f & V_1^{\mathrm{T}}B_i+E\hat{B}_fD_i & P_{1i}-V_1-V_1^{\mathrm{T}} & * & * & * \\ V_3^{\mathrm{T}}A_i+\bar{r}\hat{B}_fC_i & \hat{A}_f & V_3^{\mathrm{T}}B_i+\hat{B}_fD_i & P_{2i}^{\mathrm{T}}-V_3^{\mathrm{T}}-V_2^{\mathrm{T}}E^{\mathrm{T}} & P_{3i}-V_2-V_2^{\mathrm{T}} & * & * \\ aE\hat{B}_fC_i & 0 & 0 & 0 & 0 & a(P_{1i}-V_1-V_1^{\mathrm{T}}) & * \\ a\hat{B}_fC_i & 0 & 0 & 0 & 0 & a(P_{2i}^{\mathrm{T}}-V_3^{\mathrm{T}}-V_2^{\mathrm{T}}E^{\mathrm{T}}) & a(P_{3i}-V_2-V_2^{\mathrm{T}}) \end{bmatrix}<0, \tag{37}$$

$$\begin{bmatrix} -P_{1i} & * & * \\ -P_{2i}^{\mathrm{T}} & -P_{3i} & * \\ L_i & -\hat{C}_f & -\gamma^2 I \end{bmatrix} < 0,\ i=1,\cdots,S \tag{38}$$

成立, 其中$a=(1-\bar{r})\bar{r}$, $E=\begin{bmatrix} I_{k*k} \\ 0_{(n-k)*k} \end{bmatrix}$. 进而滤波器的参数可由式(32)计算得到.

注 4 推论1中由于Lyapunov矩阵$\begin{bmatrix} P_{1i} & P_{2i} \\ P_{2i}^{\mathrm{T}} & P_{3i} \end{bmatrix}$与系统矩阵没有了耦合, 那么对于凸多面体的每个顶点i允许不同的正定矩阵$\begin{bmatrix} P_{1i} & P_{2i} \\ P_{2i}^{\mathrm{T}} & P_{3i} \end{bmatrix}$满足要求, 这将比二次稳定条件得出的结果有更小的设计保守性.

5 仿真例子(Numerical simulation)

系统的参数如下:

$$A=\begin{bmatrix} 0 & 0.3 \\ -0.2 & 0.4 \end{bmatrix},\ B=\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},\ C=\begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D=1,\ L=\begin{bmatrix} 1\, 2 \end{bmatrix},\ \bar{r}=0.8.$$

由定理3, 利用MATLAB LMI Toolbox, 选取$E=$

$\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}$可得最优$\gamma=0.3373$时LMI(30)的解为

$P_1=\begin{bmatrix}286.6740 & 6.2153\\ 6.2153 & 35.6333\end{bmatrix}$, $P_2=\begin{bmatrix}281.8018 & 6.3503\\ 6.3483 & 34.9542\end{bmatrix}$,

$P_3=\begin{bmatrix}281.8818 & 6.3258\\ 6.3258 & 34.9620\end{bmatrix}$, $\hat{A}_f=\begin{bmatrix}-7.8749 & 87.5043\\ -34.0936 & 17.6635\end{bmatrix}$,

$\hat{B}_f=\begin{bmatrix}-11.0568\\ -32.4459\end{bmatrix}$, $\hat{C}_f=\begin{bmatrix}-0.9963 & -1.9624\end{bmatrix}$,

$V_1=\begin{bmatrix}300.7434 & 5.8334\\ 5.8701 & 35.6930\end{bmatrix}$, $V_2=\begin{bmatrix}295.8813 & 6.0021\\ 5.9662 & 35.0139\end{bmatrix}$,

$V_3=\begin{bmatrix}295.7062 & 6.0153\\ 6.0520 & 34.9984\end{bmatrix}$,

那么由式(32)可求得全阶滤波器为

$$A_f=\begin{bmatrix}-0.0069 & 0.2865\\ -0.9725 & 0.4557\end{bmatrix}, B_f=\begin{bmatrix}-0.0186\\ -0.9235\end{bmatrix},$$
$$C_f=\begin{bmatrix}-0.9963 & -1.9624\end{bmatrix}.$$

选取$E=\begin{bmatrix}1\\ 0\end{bmatrix}$, 可得该系统的1阶滤波器为

$$A_f=0.5253,\ B_f=-0.2456,\ C_f=-3.5200,$$

此时的最优$\gamma=2.0103$.

6 结论(Conclusion)

本文对于一类具有测量数据丢失的网络化系统, 利用LMI方法给出了全阶和降阶l_2-l_∞滤波器存在的充分条件. 同时将设计方法推广到凸多面体不确定网络化系统的l_2-l_∞滤波器设计.

参考文献(References):

[1] YANG F, WANG Z, HUNG Y S. Robust Kalman filtering for discrete time-varying uncertain systems with multiplicative noise[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(7): 1179 – 1183.

[2] PINTELON R, SCHOUKENS J. Frequency domain system identification with missing data[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(2): 364 – 369.

[3] SAVKIN V, PETERSEN I R. Robust filtering with missing data and a deterministic description of noise and uncertainty[J]. *Int J of System Science*, 1997, 28(4): 373 – 390.

[4] WANG Z D, YANG F W, DANIEL W C, et al. Robust finite-horizon filtering for stochastic systems with missing measurement[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(6): 437 – 440.

[5] 王武, 杨富文. 具有测量数据部分丢失的离散系统的H_∞滤波器设计[J]. 自动化学报, 2006, 32(1): 107 – 111.
(WANG Wu, YANG Fuwen. H_∞ filter design for discrete-time systems with missing measurements. *Acta Automatica Sinica*, 2006, 32(1): 107 – 111.)

[6] SMITH S C, SEILER P. Estimation with lossy measurements: jump estimators for jump systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(12): 2163 – 2171.

[7] GAO H J, WANG C H. New approaches to robust l_2-l_∞ and H_∞ filtering for uncertain discrete-time systems[J]. *Science in China (Series E)*, 2003, 33(8): 695 – 706.

[8] YANG F, WANG Z, HUNG Y S, et al. H_∞ control for networked systems with random communication delays[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2006, 51(3): 511 – 518.

[9] de OLIVEIRA M C, BERNUSSOU J, GEROMEL J C. A new discrete time robust stability condition[J]. *Systems & Control Letters*, 1999, 37(4): 261 – 265.

[10] GAO H J, WANG C H. A delay-dependent approach to robust H_∞ filtering for uncertain discrete-time state-delayed systems[J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2004, 52(6): 1631 – 1640.

作者简介:

王　武　(1973—), 男, 2003年毕业于福州大学, 2004年获博士学位, 现为福州大学电气工程与自动化学院副教授, 主要研究方向为网络化系统的控制与滤波、非脆弱控制等, E-mail: wangwu@fzu.edu.cn;

蔡逢煌　(1976—), 男, 2007年毕业于福州大学并获博士学位, 现为福州大学电气工程与自动化学院讲师, 主要研究方向为迭代学习控制、网络化系统的控制与滤波等;

林琼斌　(1976—), 男, 现为福州大学电气工程与自动化学院讲师, 在职博士研究生, 主要研究方向为网络化环境下模糊系统控制与滤波;

杨富文　(1963—) , 男, 福州大学电气工程与自动化学院教授, 博士生导师, 主要研究方向鲁棒控制、鲁棒滤波、迭代学习控制等.