

具有测量数据丢失的网络化系统的故障检测滤波

阮玉斌, 王 武, 杨富文

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 研究一类具有测量数据部分丢失的网络化系统的故障检测滤波器设计问题. 测量数据的丢失假设满足已知概率的Bernoulli分布. 设计一个故障检测滤波器, 使残差误差系统均方指数稳定且具有一定的扰动衰减水平. 采用线性矩阵不等式方法, 给出了故障检测滤波器存在的充分条件. 最后通过例子说明该方法的有效性.

关键词: 故障检测; 网络化系统; 测量数据丢失; H_∞ 范数; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Fault detection filter for networked systems with missing measurements

RUAN Yu-bin, WANG Wu, YANG Fu-wen

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

Abstract: A fault detection filter(FDF) for a class of networked systems with missing measurements is studied. The packet data loss is modeled as a Bernoulli distributed white sequence with a known conditional probability distribution. A fault detection filter is then designed to make the residual error system exponentially mean-square stable with a prescribed disturbance attenuation level. A sufficient condition is also derived in terms of linear matrix inequality(LMI). Finally, a numerical example illustrates the effectiveness of the proposed approach.

Key words: fault detection; networked system; missing measurements; H-infinity norm; LMI

1 引言(Introduction)

网络化系统是对象和各部件间通过网络连接构成的复杂系统, 具有连接简单, 易扩展, 维护方便等优点, 近年来成为学者们研究的热点之一. 网络化系统的测量数据以打包方式通过网络进行传输时, 由于网络拥塞等原因, 测量数据包丢失是不可避免的, 这会使基于传统方法设计的故障检测器的性能下降, 甚至失去作用. 目前, 具有测量信号丢失的网络化系统故障检测的研究在国内外已受到学者们的重视, 并取得一定的研究成果^[1,2], 这些成果是基于不同的数据丢失描述方法来研究问题, 文献[1]采用Markov随机过程来描述测量数据丢失, 文献[2]运用混合系统来描述数据丢失. 此外, 系统的数据丢失还可采用Bernoulli随机二进制切换序列来描述^[3~7], 利用Bernoulli随机二进制切换序列来描述测量数据丢失方法不仅简单且物理意义明确, 目前, 对用这种方法描述数据丢失的研究主要集中在控制和滤波^[3~7], 在网络化系统故障检测方面的研究未见报道. 本文采用一个满足Bernoulli随机二进制

切换序列来描述离散的网络化系统测量数据丢失, 针对系统存在故障和未知干扰情况下, 研究网络化系统的故障检测滤波器(简称FDF)设计问题, 所设计的FDF对故障敏感, 对外部扰动具有一定的鲁棒性.

文中: 上标“T”表示矩阵转置, I 为合适维数的单位矩阵, $\|\cdot\|$ 表示欧氏2-范数, $\lambda_{\min}(A)$ ($\lambda_{\max}(A)$)表示矩阵的最小(最大)特征值, $E\{\cdot\}$ 表示数学期望.

2 问题描述(Problem formulation)

考虑如下的离散系统 P :

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + B_w w(k) + B_f f(k), \\ y(k) = Cx(k) + D_f f(k). \end{cases} \quad (1)$$

其中: $x(k) \in \mathbb{R}^n$ 是状态向量, $w(k) \in \mathbb{R}^l$ 为外部干扰输入向量, $f(k) \in \mathbb{R}^q$ 为被检测的故障向量, 设 $w(k)$ 和 $f(k)$ 均为 l_2 范数有界向量, $y(k) \in \mathbb{R}^p$ 为系统测量输出向量, A , B_w , B_f , C 和 D_f 为合适维数已知实矩阵.

假设 1 A 是稳定的.

收稿日期: 2007-09-04; 收修改稿日期: 2008-06-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60874059, 60604027); 福建省自然科学基金资助项目(2008J0191, 2007J0018); 福建省教育厅项目(JB05015).

假设2 测量信号 $y(k)$ 是以单包的方式在网络上传输。

设计如下的FDF:

$$\begin{cases} \hat{x}(k+1) = \hat{A}\hat{x}(k) + \hat{B}y_c(k), \\ r(k) = \hat{C}\hat{x}(k). \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\hat{x}(k) \in \mathbb{R}^n$ 为状态估计, $r(k) \in \mathbb{R}^p$ 为FDF残差输出, $\hat{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\hat{B} \in \mathbb{R}^{n \times p}$ 和 $\hat{C} \in \mathbb{R}^{p \times n}$ 为被设计的参数矩阵。

$y_c(k)$ 是FDF通过网络得到用来产生残差的测量信号, 并且规定: 在 k 时刻, 当网络通讯正常时, $y_c(k) = y(k)$, 即FDF用 $y(k)$ 产生残差; 当网络出现数据丢失时, FDF用前一时刻得到的测量信号 $y_c(k-1)$ 产生残差, 即 $y_c(k) = y_c(k-1)$. 综合上述, 可用下式表示:

$$y_c(k) = \delta(k)y(k) + (1 - \delta(k))y_c(k-1). \quad (3)$$

其中: $\delta(k) \in \mathbb{R}$ 为满足Bernoulli 0-1序列分布的随机变量, 用来描述测量信号在网络上传输状况, $\delta(k)$ 的概率为

$$\begin{cases} \text{Prob}\{\delta(k) = 1\} = E\{\delta(k)\} := \bar{\delta}, \\ \text{Prob}\{\delta(k) = 0\} = 1 - E\{\delta(k)\} := 1 - \bar{\delta}, \\ E\{(\delta(k) - \bar{\delta})^2\} = (1 - \bar{\delta})\bar{\delta} = a, \end{cases} \quad (4)$$

其中 $\bar{\delta}$ 是一个已知的标量。

注1 由式(2)(3)表示的FDF产生残差同文献[1]一样, 都在测量丢失时, 利用前一时刻得到的测量信号产生残差, 但本文是用一个带有Bernoulli随机变量的方程表示, 而文献[1]却用Markov跳跃系统来描述。

注2 由式(3)可知, 在 $k-1$ 时刻, 如果测量丢失, $\delta(k-1) = 0$, 则 $y_c(k-1) = y_c(k-2)$, 在 k 时刻, 测量继续丢失, $\delta(k) = 0$, 则 $y_c(k) = y_c(k-2)$, 依此类推, 可以保证FDF在任何时候都能得到产生残差的测量信号。

定义下面几个向量: $\bar{x}^T(k) = [x^T(k) \ \hat{x}^T(k)]$ 为增广状态向量, $r_e(k) = r(k) - f(k)$ 为残差误差信号, 并令 $\bar{w}^T(k) = [w^T(k) \ f^T(k)]$, 由式(1)~(3), 整理得一增广系统 Σ :

$$\begin{cases} \bar{x}(k+1) = \bar{A}_1\bar{x}(k) + \bar{A}_3\bar{x}(k-1) + \bar{B}\bar{w}(k), \\ r_e(k) = C_1\bar{x}(k) + D_1\bar{w}(k). \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{aligned} \bar{A}_1 &= A_1 + (\delta(k) - \bar{\delta})A_2, \quad \bar{A}_3 = A_3 + (\delta(k) - \bar{\delta})A_4, \\ \bar{B} &= B_1 + (\delta(k) - \bar{\delta})B_2, \quad A_1 = \begin{bmatrix} A & 0 \\ \bar{\delta}\hat{B}C & \hat{A} + (1 - \bar{\delta})\hat{A} \end{bmatrix}, \\ A_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \hat{B}C & -I \end{bmatrix}, \quad A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -(1 - \bar{\delta})\hat{A} \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_4 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \hat{A} \end{bmatrix}, \quad B_1 = \begin{bmatrix} B_w & B_f \\ 0 & \bar{\delta}\hat{B}D_f \end{bmatrix}, \\ B_2 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \hat{B}D_f \end{bmatrix}, \quad C_1 = [0 \ \hat{C}], \quad D_1 = [0 \ -I]. \end{aligned}$$

定义1 对系统 Σ 在 $\bar{w}(k) = 0$ 时, 存在 $\alpha > 0$ 和 $\tau \in (0, 1)$, 使得 $E\{\|\bar{x}(k)\|^2\} \leq \alpha \tau^k E\{\|\bar{x}(0)\|^2\}$, $\forall \bar{x}(0) \neq 0$, 称系统为均方意义下指数稳定。

本文的目的是在一定测量丢失概率情况下, 设计由式(2)所示的FDF, 对所有系统干扰输入, 系统 Σ :

- 1) 在 $\bar{w}(k) = 0$ 情况下, 系统 Σ 均方指数稳定;
- 2) 在零初始条件下, 残差误差 $r_e(k)$ 满足如下的 H_∞ 性能指标:

$$E\|r_e(k)\|_2 < \gamma E\|\bar{w}(k)\|_2, \quad (6)$$

其中 $\gamma > 0$ 为给定的标量。

本文选择评价函数 $J(r, k)$ 和阈值 J_{th} 分别如下:

$$\begin{cases} J(r, k) = \left\{ \sum_{k=k_0}^{k_0+N} r^T(k)r(k) \right\}^{1/2}, \\ J_{th} = \sup_{w(k) \in l_2, f(k)=0} E[J(r, k)]. \end{cases} \quad (7)$$

其中: k_0 表示初始评价时刻, N 表示选择的时间窗宽度。

通过如下的比较决策就能检测出系统是否发生故障:

$$\begin{cases} J(r, k) > J_{th} \Rightarrow \text{abnormal} \Rightarrow \text{fault}, \\ J(r, k) \leq J_{th} \Rightarrow \text{normal}. \end{cases} \quad (8)$$

3 主要结果(Main results)

定理1 给定标量 $\gamma > 0$, 对所有 $\bar{w}(k) \neq 0$, 在一定的测量信号丢失概率下, 如果存在正定对称矩阵 $P \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ 和 $Q \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ 满足

$$\begin{bmatrix} -P + Q & 0 & 0 & A_1^T P & aA_2^T P & C_1^T \\ * & -Q & 0 & A_3^T P & aA_4^T P & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I & B_1^T P & aB_2^T P & D_1^T \\ * & * & * & -P & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -aP & 0 \\ * & * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (9)$$

那么系统 Σ 是均方指数稳定且满足式(6)所示的 H_∞ 性能指标。

证 定义系统 Σ 的Lyapunov函数:

$$V(k) = \bar{x}^T(k)P\bar{x}(k) + \bar{x}^T(k-1)Q\bar{x}(k-1),$$

证明分两步:

1) 先证稳定性($\bar{w}(k) = 0$):

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

$$E\{(\bar{A}_1 \bar{x}(k) + \bar{A}_3 \bar{x}(k-1))^T P (\bar{A}_1 \bar{x}(k) + \bar{A}_3 \bar{x}(k-1) + \bar{x}^T(k) Q \bar{x}(k)) - \bar{x}^T(k) P \bar{x}(k) - \bar{x}^T(k-1) Q \bar{x}(k-1) = \tilde{x}^T(k) \Lambda \tilde{x}(k).$$

其中:

$$\tilde{x}(k) = \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ \bar{x}(k-1) \end{bmatrix},$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -P + Q & 0 \\ 0 & -Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1^T P & aA_2^T P \\ A_3^T P & aA_4^T P \end{bmatrix} \times$$

$$\begin{bmatrix} P^{-1} & 0 \\ 0 & (aP)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} PA_1 & aPA_3 \\ aPA_2 & aPA_4 \end{bmatrix}.$$

显然, 利用Schur引理, 式(9)隐含 $\Lambda < 0$, 由文献[8]定理1可知系统 Σ 是均方指数稳定.

2) 再证 H_∞ 性能($\bar{w}(k) \neq 0$):

$$E\{V(k+1)\} - E\{V(k)\} + E\{r_e^T(k)r_e(k)\} - \gamma^2 E\{\bar{w}^T(k)\bar{w}(k)\} =$$

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ \bar{x}(k-1) \\ \bar{w}(k) \end{bmatrix}^T \Psi \begin{bmatrix} \bar{x}(k) \\ \bar{x}(k-1) \\ \bar{w}(k) \end{bmatrix}.$$

其中 Ψ 由式(10)表示.

$$\Psi = \begin{bmatrix} A_1^T P A_1 + aA_2^T P A_2 + Q - P & * & * \\ A_3^T P A_1 + aA_4^T P A_2 & A_3^T P A_3 + aA_4^T P A_4 - Q & * \\ B_1^T P A_1 + aB_2^T P A_2 & B_1^T P A_3 + aB_2^T P A_4 & -\gamma^2 I \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1^T C_1 & * & * \\ 0 & 0 & * \\ D_1^T C_1 & 0 & D_1^T D_1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

利用Schur引理, 式(9)等于 Ψ , 因此 $\Psi < 0$, 从而 $E\|r_e(k)\|_2 < \gamma E\|\bar{w}(k)\|_2$ 成立, 即系统 Σ 具有 H_∞ 性能 γ , 证明方法类似文献[8]定理2的证明.

证毕.

下面给出FDF设计方法.

定理 2 给定 $\gamma > 0$, 在一定测量丢失概率下, 如果存在正定对称矩阵 $W \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $Y \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $Z_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 和 $Z_3 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 、矩阵 $Z_2 \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $M \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $N \in \mathbb{R}^{p \times n}$, $S \in \mathbb{R}^{n \times p}$, 满足式(12), 则系统 Σ 是均方指数稳定且满足式(6)所示的性能指标, 同时由式(2)所示的FDF的参数:

$$\hat{A} = (W - Y)^{-1}M,$$

$$\hat{B} = (W - Y)^{-1}Z, \hat{C} = N.$$

证 采用文献[9]的方法, 取

$$P = \begin{bmatrix} Y & U \\ U^T & ? \end{bmatrix}, P^{-1} = \begin{bmatrix} X & V \\ V^T & ? \end{bmatrix}.$$

其中: X 和 Y 是 $\mathbb{R}^{n \times n}$ 正定对称阵, U 和 V 是满秩矩阵, $?$ 为任意矩阵, 由 $P * P^{-1} = I$ 决定.

构造矩阵 Π_1, Π_2 分别为

$$\Pi_1 = \begin{bmatrix} X & I \\ V^T & 0 \end{bmatrix}, \Pi_2 = \begin{bmatrix} I & Y \\ 0 & U^T \end{bmatrix}.$$

有 $P\Pi_1 = \Pi_2$.

取变换阵 $\Gamma_1 = \text{diag}\{\Pi_1, \Pi_1, I, \Pi_1, \Pi_1, I\}$, 并令

$$\Pi_1^T Q \Pi_1 = \begin{bmatrix} XZ_1X & XZ_2^T \\ Z_2X & Z_3 \end{bmatrix}.$$

对式(9)进行左乘 Γ_1^T 和右乘 Γ_1 的合同变换, 得矩阵式(11):

$$\begin{bmatrix} XZ_1X - X & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ Z_2X - I & Z_3 - Y & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -XZ_1X & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -Z_2X & -Z_3 & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I & * & * & * & * & * \\ AX & A & 0 & 0 & B_w & B_f & -X & * & * & * & * \\ \Omega_1 & \Omega_3 & \Omega_4 & 0 & YB_w & \Omega_5 & -I & -Y & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -aX & * & * \\ \Omega_2 & aU\hat{B}\hat{C} & aU\hat{A}V^T & 0 & 0 & aU\hat{B}D_f & 0 & 0 & -aI & -aY & * \\ \hat{C}V^T & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (11)$$

其中:

$$\begin{aligned}\Omega_1 &= YAX + \bar{\delta}U\hat{B}CX + U\hat{A}V^T + (1 - \bar{\delta})UV^T, \\ \Omega_2 &= aU\hat{B}CX - aUV^T, \quad \Omega_3 = YA + \bar{\delta}U\hat{B}C, \\ \Omega_4 &= -(1 - \bar{\delta})U\hat{A}V^T, \quad \Omega_5 = YB_f + \bar{\delta}U\hat{B}D_f.\end{aligned}$$

取变换阵

$$\Gamma_2 = \text{diag}\{X^{-1}, I, X^{-1}, I, I, X^{-1}, I, X^{-1}, I, I\},$$

对式(11)进行左乘 Γ_2^T 和右乘 Γ_2 的合同变换, 并令

$$\begin{aligned}X^{-1} &= W, \quad U\hat{A}V^T = MW^{-1}, \\ \hat{C}V^T &= NW^{-1}, \quad U\hat{B} = S,\end{aligned}$$

由 $P * P^{-1} = I$, 可得

$$YX + UV^T = I, \quad UV^TW = W - Y,$$

得矩阵式(12):

$$\begin{bmatrix} Z_1 - W & * & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ Z_2 - W & Z_3 - Y & * & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -Z_1 & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & -Z_2 - Z_3 & * & * & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I & * & * & * & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\gamma^2 I & * & * & * & * & * \\ WA & WA & 0 & 0 & WB_w & WB_f - W & * & * & * & * & * \\ \Xi_1 & \Xi_3 & \Xi_4 & 0 & YB_w & \Xi_5 & -W & -Y & * & * & * \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -aW & * & * \\ \Xi_2 & aSC & aM & 0 & 0 & aSD_f & 0 & 0 & -aW & -aY & * \\ N & 0 & 0 & 0 & 0 & -I & 0 & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0, \quad (12)$$

其中:

$$\begin{aligned}\Xi_1 &= YA + \bar{\delta}SC + M + (1 - \bar{\delta})(W - Y), \\ \Xi_2 &= aSC - a(W - Y), \quad \Xi_3 = YA - \bar{\delta}SC, \\ \Xi_4 &= -(1 - \bar{\delta})M, \quad \Xi_5 = YB_f + \bar{\delta}SD_f.\end{aligned}$$

由式(2)所示的FDF的传递函数:

$$\begin{aligned}T_f &= \hat{C}(zI - \hat{A})^{-1}\hat{B} = \\ &= NW^{-1}V^{-T}(zI - U^{-1}MW^{-1}V^{-T})^{-1}(U^{-1}S) = \\ &= N(zI - (UV^TW)^{-1}M)^{-1}(UV^TW)^{-1}S,\end{aligned}$$

则FDF的参数有

$$\hat{A} = (UV^TW)^{-1}M, \quad \hat{B} = (UV^TW)^{-1}S, \quad \hat{C} = N.$$

利用 $P * P^{-1} = I$, 可得 $YX + UV^T = I, UV^TW = W - Y$, 因此, 有

$$\hat{A} = (W - Y)^{-1}M, \quad \hat{B} = (W - Y)^{-1}S, \quad \hat{C} = N.$$

定理2得证. 证毕.

定理2给出了存在FDF的LMI条件和由式(2)所示的FDF参数设计方法, 通过MATLAB工具可以得到所需的FDF, 再利用式(7)可计算出阈值 J_{th} , 由式(8)就可容易检测出系统对象是否发生故障.

利用 MATLAB 工具的优化功能进一步优化FDF的设计, 可令 $g = \gamma^2$, 由下式可得到最小的 γ :

$$\begin{aligned}\min_{W, Y, Z_1, Z_2, Z_3, M, N, S} \quad & g \\ \text{s.t.} \quad & \text{式(12)}.\end{aligned}$$

4 例子仿真(Numerical simulation)

考虑式(1)所示的离散系统具有如下的参数:

$$\begin{aligned}A &= \begin{bmatrix} 0.5 & -0.6 & 0.7 \\ -0.2 & 0.4 & 0.5 \\ 0.6 & 0.3 & -0.3 \end{bmatrix}, \quad B_w = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.3 \\ 0.5 \end{bmatrix}, \\ B_f &= \begin{bmatrix} 0.35 \\ 0.45 \\ 0.2 \end{bmatrix}, \quad C = [3.9 \quad 2.5 \quad 3.5], \quad D_f = 1.6.\end{aligned}$$

令 $\bar{\delta} = 0.7$, 利用MATLAB的LMI工具箱得

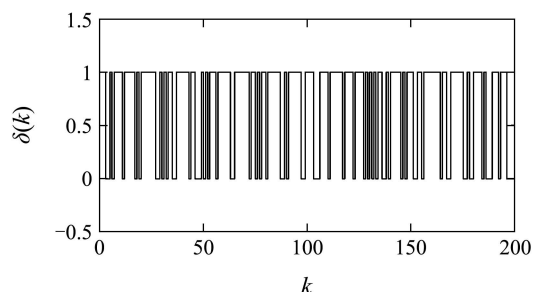
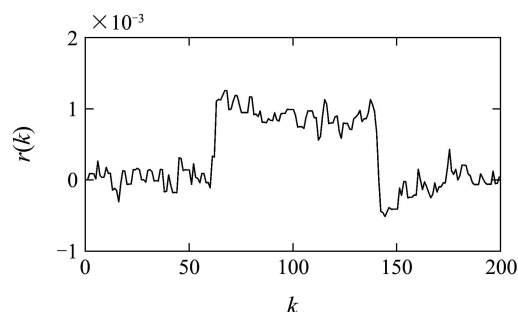
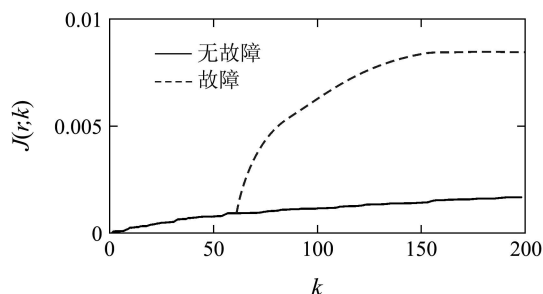
$$\hat{A} = \begin{bmatrix} -0.0517 & -0.2871 & 0.1369 \\ -0.1831 & -0.1248 & 0.0965 \\ 0.1286 & 0.0305 & -0.2756 \end{bmatrix}, \quad \hat{B} = \begin{bmatrix} 0.0823 \\ 0.1565 \\ 0.0749 \end{bmatrix},$$

$$\hat{C} = [-0.0008 \quad 0.0010 \quad 0.0010], \quad \gamma = 1.0019.$$

随机参数 $\delta(k)$ 的变化规律由图1表示. 初始时间 $k_0 = 0$, 时间宽度 $N = 200$, 设 $w(k)$ 为一幅值不超过0.5, 能量为0.005的白噪声信号, 故障信号 $f(k)$ 设定为

$$f(k) = \begin{cases} 1, & k = 60, \dots, 140, \\ 0, & \text{其他}, \end{cases}$$

则可得到残差信号 $r(k)$ 如图2所示, 有无故障时残差评价函数 $J(r, k)$ 的曲线如图3所示, 从图中可以看出, 故障信号发生时, 残差信号和残差评价函数均有明显的变化. 求得 $J_{th} = 0.0017$, $J(r, 66) = 0.0020 > J_{th}$, 可见当 t 在故障发生之后6个时间周期, FDF便能检测出故障.

图1 $\delta(k)$ 变化规律Fig. 1 Change of $\delta(k)$ 图2 $r(k)$ 变化规律Fig. 2 Generated residual $r(k)$ 图3 $J(r, k)$ 变化规律Fig. 3 Evolution of $J(r, k)$

5 结论(Conclusion)

本文研究了既有测量信号丢失又有外部干扰的网络化系统的故障检测滤波器设计问题, 此问

题可归化为一个 H_∞ 滤波器设计问题, 用一个线性矩阵不等式反映出此FDF的稳定性和满足一定 H_∞ 性能指标, 例子说明方法的有效性.

参考文献(References):

- [1] ZHANG P, DING S X, FRANK P M. Fault detection of Networked control systems with missing measurements[C] // *Proceedings of the 5th Asian Control Conference*. New York: IEEE Press, 2004: 1258 – 1263.
- [2] ZHONG M, HAN Q. Fault detection filter design for a class of networked control systems[C] // *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*. New York: IEEE Press, 2006: 215 – 219.
- [3] WANG Z, YANG F, HO D W C, et al. Robust finite horizon filtering for stochastic systems with missing measurements[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(6): 437 – 440.
- [4] WANG Z, HO D W C, LIU X. Variance constrained filtering for uncertain stochastic systems with missing measurements[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2003, 48(7): 1254 – 1258.
- [5] YANG F, WANG Z, GANI M. Robust H_2/H_∞ filtering for uncertain systems with missing measurement[C] // *Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control*. New York: IEEE Press, 2006: 4769 – 4774.
- [6] WANG W, YANG F. H_∞ filter design for discrete-time systems with missing measurements[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2006, 32(1): 107 – 111.
- [7] 王武, 林琼斌, 杨富文. 具有数据丢失的网络控制系统的 H_∞ 输出反馈控制[J]. 信息与控制, 2007, 36(3): 285 – 292.
(WANG Wu, LIN Qiongbin, YANG Fuwen. H_∞ output feedback control for networked control system with data missing[J]. *Information and Control*, 2007, 36(3): 285 – 292.)
- [8] YANG F, WANG Z, HUNG Y S, et al. H_∞ control for networked systems with random communication delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(3): 511 – 518.
- [9] 王武, 杨富文. 具有随机通讯时延的离散网络化系统的 H_∞ 滤波器设计[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(1): 1 – 6.
(WANG Wu, YANG Fuwen. H_∞ filter designing for discrete time networked systems with random communication delays[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(1): 1 – 6.)

作者简介:

阮玉斌 (1970—), 男, 在职博士研究生, 目前研究方向为网络化系统的控制与故障检测等, E-mail: RYB@fzu.edu.cn;

杨富文 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为鲁棒控制、鲁棒滤波、迭代学习控制等, E-mail: fwyang@fzu.edu.cn;

王武 (1973—), 男, 副教授, 博士, 目前研究方向为网络化系统的控制与滤波、非脆弱控制, E-mail: wangwu@fzu.edu.cn.