文章编号: 1001-0920(2006)08-0941-04

# 离散时滞切换系统的无记忆状态反馈镇定

卢建宁, 张彦虎, 赵光宙
(浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

**摘　要**: 针对一类子系统为离散时滞系统的切换系统, 研究了稳定性与无记忆状态反馈镇定问题. 采用多李雅普诺夫函数法, 首先以线性矩阵不等式形式给出了在任意切换信号作用下离散时滞切换系统渐进稳定的一个充分性条件; 然后给出了系统无记忆状态反馈镇定的控制器设计方案, 并将结果推广到不确定离散时滞切换系统; 最后用仿真算例验证了所提出设计方案的可行性.

**关键词**: 切换系统; 时滞; 多李雅普诺夫函数; 镇定
**中图分类号**: TP13　　**文献标识码**: A

# Memoryless State Feedback Stabilization for Discrete Switched Systems with Time Delay

*LU Jian-ning, ZHANG Yan-hu, ZHAO Guang-zhou*
(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China. Correspondent: LU Jian-ning, E-mail: lu_jianning@163.com)

**Abstract**: Stability and memoryless state feedback stabilization for discrete switched systems with time delay subsystems are studied. Based on multiple Lyapunov functions theory, a sufficient condition in form of linear matrix inequalities is derived for the asymptotic stability under arbitrary switching laws. Then, a memoryless state feedback stabilization method is established, and the result is extended to uncertain discrete switched systems with time delay. A numerical example illustrates the feasibility of the designed controller.

**Key words**: Switched systems; Time delay; Multiple Lyapunov functions; Stabilization

## 1　引　言

切换系统是混杂系统中形式上较为简单但又比较典型的一类系统. 它包含几个子系统和一个决定某一时刻活动子系统的切换规则. 当系统的状态或时间满足某种条件时, 子系统便发生变化, 由一个子系统切换到另一个子系统. 在过去的近10年中, 得到了前所未有的重视, 使得它在许多方面的性质得到了不同程度的研究和探索.

切换系统稳定性方面的研究已经取得了相当多的成果. 文献[1～3]综述了近几年切换系统在稳定性分析与控制设计方面的研究成果, 提出采用多李雅普诺夫函数的方法分析稳定性, 大大减小了单李雅普诺夫函数方法的保守性, 其中文献[3]提出了切换系统稳定性理论的3个基本研究方向. 文献[4]将参数依赖稳定性条件与多李雅普诺夫函数相结合, 提出了离散切换系统稳定性分析与反馈镇定的一种新方法. 文献[5]从切换系统的凸组合条件出发, 研究了通过反馈控制和切换信号的选取使系统镇定的方法.

在许多实际工程系统中, 时滞现象是极其普遍的, 如通信系统、电力系统、化工过程系统等均存在着物质或信息的传输延迟, 这些系统都是典型的时滞系统. 然而, 迄今为止关于时滞切换系统镇定方面的研究成果还比较少.

文献[6]研究了时滞切换系统的动态输出反馈镇定问题, 但对矩阵的选取有特殊限制, 因而实质上

**收稿日期**: 2005-06-06; **修回日期**: 2005-11-07.
**作者简介**: 卢建宁(1978—), 男, 浙江永康人, 博士生, 从事混杂系统理论与应用的研究; 赵光宙(1946—), 男, 浙江义乌人, 教授, 博士生导师, 博士, 从事非线性系统控制、信号处理等研究.

不能用LMI求解; 文献[7]研究了时滞切换系统的二次稳定和$L_2$增益分析, 但要求系统矩阵对称; 文献[8]研究了时滞切换系统的稳定性和状态反馈镇定问题.

本文在前人的基础上, 研究任意切换信号作用下的离散时滞切换系统的稳定性问题. 首先以线性矩阵不等式的形式给出了在任意切换信号作用下系统渐进稳定的一个新的充分性条件; 然后给出了系统的无记忆状态反馈镇定的控制器设计方案, 并将其推广到不确定离散时滞切换系统; 最后通过仿真算例验证了设计方案的可行性.

## 2 系统描述

考虑如下离散时滞切换系统:

$$\begin{aligned}&x(k+1)=\\&A_i x(k)+A_{di}x(k-d)+B_i u(k),\\&i(k)=s(x(k),i(k-1)).\end{aligned}\tag{1}$$

其中: $x(k)\in \mathbf{R}^n$ 为系统的状态向量; $u(k)\in \mathbf{R}^p$ 为系统的输入向量; $A_i, A_{di}\in \mathbf{R}^{n\times n}, B_i\in \mathbf{R}^{n\times p}$ 为具有适当维数的常数矩阵; $d$ 为正整数, 表示滞后时间; $s$: $[0,\infty)\to\in M=\{1,2,\cdots,m\}$ 表示系统的切换方案.

## 3 稳定性分析

**引理 1**[9,10] 对于给定适当维数的矩阵$Y, M$ 和 $N$, 其中 $Y$ 对称, 则 $Y+M\Gamma N+N^{\mathrm T}\Gamma^{\mathrm T}M^{\mathrm T}<0$ 对于所有满足 $\sigma_{\max}(\Gamma)\leq 1$ 的矩阵 $\Gamma$ 成立的充要条件是存在常数 $\epsilon>0$, 使得 $Y+\epsilon MM^{\mathrm T}+\epsilon^{-1}N^{\mathrm T}N<0$.

**引理 2**[11] 对于离散时滞切换系统

$$\begin{aligned}&x(k+1)=A_i x(k)+A_{di}x(k-d),\\&i(k)=s(x(k),i(k-1)),\end{aligned}\tag{2}$$

若存在对称正定矩阵 $P_1,\cdots,P_m,S\in \mathbf{R}^{n\times n}$, 满足下述条件:

$$\begin{bmatrix}A_i^{\mathrm T}P_jA_i-P_i+S & A_i^{\mathrm T}P_jA_{di}\\ A_{di}^{\mathrm T}P_jA_i & A_{di}^{\mathrm T}P_jA_{di}-S\end{bmatrix}<0,$$
$$\forall (i,j)\in M\times M,\tag{3}$$

则对于任意切换方案, 均可保证系统(2) 渐进稳定.

**定理 1** 对于离散时滞切换系统(2), 若存在对称正定矩阵 $X_1,\cdots,X_m,W\in \mathbf{R}^{n\times n}$, 满足下述条件:

$$\begin{bmatrix}-W & X_i & 0 & 0\\ X_i & -X_i & 0 & X_iA_i^{\mathrm T}\\ 0 & 0 & W-2X_i & X_iA_{di}^{\mathrm T}\\ 0 & A_iX_i & A_{di}X_i & -X_j\end{bmatrix}<0,$$
$$\forall (i,j)\in M\times M,\tag{4}$$

则对于任意切换方案, 均可保证系统(2) 渐进稳定.

**证明** 由引理 2 的结论, 系统(2) 对于任意切换方案均渐进稳定的充分条件是

$$\begin{bmatrix}-P_i+S & 0\\ 0 & -S\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}A_i^{\mathrm T}\\ A_{di}^{\mathrm T}\end{bmatrix}[P_j][A_i\ \ A_{di}]<0.$$

利用 Schur 补, 有

$$\begin{bmatrix}-P_i+S & 0 & A_i^{\mathrm T}\\ 0 & -S & A_{di}^{\mathrm T}\\ A_i & A_{di} & -P_j^{-1}\end{bmatrix}<0.$$

左右分别乘以$\begin{bmatrix}P_i^{-1} & 0 & 0\\ 0 & P_i^{-1} & 0\\ 0 & 0 & I\end{bmatrix}$, 有

$$\begin{bmatrix}-P_i^{-1}+P_i^{-1}SP_i^{-1} & 0 & P_i^{-1}A_i^{\mathrm T}\\ 0 & -P_i^{-1}SP_i^{-1} & P_i^{-1}A_{di}^{\mathrm T}\\ A_iP_i^{-1} & A_{di}P_i^{-1} & -P_j^{-1}\end{bmatrix}<0.$$

令 $X_i=P_i^{-1}, X_j=P_j^{-1}, W=S^{-1}$, 有

$$\begin{bmatrix}-X_i+X_iW^{-1}X_i & 0 & X_iA_i^{\mathrm T}\\ 0 & -X_iW^{-1}X_i & X_iA_{di}^{\mathrm T}\\ A_iX_i & A_{di}X_i & -X_j\end{bmatrix}<0.$$

因为$W>0$, 所以$(W-X_i)^{\mathrm T}W^{-1}(W-X_i)\geq 0$, 得 $X_iW^{-1}X_i\geq 2X_i-W$. 故有

$$\begin{bmatrix}-X_i+X_iW^{-1}X_i & 0 & X_iA_i^{\mathrm T}\\ 0 & -X_iW^{-1}X_i & X_iA_{di}^{\mathrm T}\\ A_iX_i & A_{di}X_i & -X_j\end{bmatrix}\leq$$
$$\begin{bmatrix}-X_i+X_iW^{-1}X_i & 0 & X_iA_i^{\mathrm T}\\ 0 & W-2X_i & X_iA_{di}^{\mathrm T}\\ A_iX_i & A_{di}X_i & -X_j\end{bmatrix}.$$

在上式中, 若右边矩阵负定, 则左边矩阵一定负定. 因此, 右边矩阵负定是系统(2) 对于任意切换方案均渐进稳定的一个充分条件. 再利用 Schur 补, 有

$$\begin{bmatrix}-W & X_i & 0 & 0\\ X_i & -X_i & 0 & X_iA_i^{\mathrm T}\\ 0 & 0 & W-2X_i & X_iA_{di}^{\mathrm T}\\ 0 & A_iX_i & A_{di}X_i & -X_j\end{bmatrix}<0.\qquad\square$$

## 4 状态反馈镇定

构造离散时滞切换系统(1) 的无记忆状态反馈控制 $u(k)=K_ix(k)$, 代入式(1), 得闭环系统

$$\begin{aligned}&x(k+1)=\\&(A_i+B_iK_i)x(k)+A_{di}x(k-d).\end{aligned}\tag{5}$$

**定理 2** 对于离散时滞切换系统(1), 如果存在对称正定矩阵$X_1,\cdots,X_m,W\in \mathbf{R}^{n\times n}$, 矩阵$Q_1,\cdots,Q_m\in \mathbf{R}^{p\times n}$, 使得 $\forall (i,j)\in M\times M$, 有

$$\begin{bmatrix}-W & X_i & 0 & 0\\ X_i & -X_i & 0 & (A_iX_i+B_iQ_i)^{\mathrm T}\\ 0 & 0 & W-2X_i & X_iA_{di}^{\mathrm T}\\ 0 & A_iX_i+B_iQ_i & A_{di}X_i & -X_j\end{bmatrix}<0,\tag{6}$$

则存在状态反馈控制

$$K_i=Q_iX_i^{-1},\ i\in M,\tag{7}$$

对于任意切换信号, 闭环系统(5) 是渐进稳定的.

**证明**　由定理 1, 闭环系统(5) 对于任意切换方案均渐进稳定的充分条件是

$$\begin{bmatrix} -W & X_i & 0 & 0 \\ X_i & -X_i & 0 & X_i(A_i+B_iK_i)^{\mathrm T} \\ 0 & 0 & W-2X_i & X_iA_{di}^{\mathrm T} \\ 0 & (A_i+B_iK_i)X_i & A_{di}X_i & -X_j \end{bmatrix} < 0.$$

令 $Q_i = K_iX_i$, 定理即可得证 □

## 5　扩展到不确定系统

考虑如下不确定离散时滞切换系统:

$$\begin{aligned} & x(k+1) = \\ & (A_i+\Delta A_i)x(k) + (A_{di}+ \\ & \Delta A_{di})x(k-d) + (B_i+\Delta B_i)u(k), \\ & i(k) = s(x(k), i(k-1)). \end{aligned} \tag{8}$$

其中系统的不确定参数具有如下形式:

$$[\Delta A_i, \Delta A_{di}, \Delta B_i] = D_i\Gamma[E_{i1}, E_{i2}, E_{i3}],$$

式中: $D_i$, $E_{i1}$, $E_{i2}$ 和 $E_{i3}$ 为已知的具有适当维数的实常数矩阵, $\sigma_{\max}(\Gamma) \le 1$. 其他参数定义如系统(1).

构造切换系统(8) 的无记忆状态反馈控制为 $u(k) = K_i x(k)$, 代入式(8), 得闭环系统

$$\begin{aligned} & x(k+1) = \\ & ((A_i+\Delta A_i) + (B_i+\Delta B_i)K_i)x(k) + \\ & (A_{di}+\Delta A_{di})x(k-d). \end{aligned} \tag{9}$$

**定理 3**　对于不确定离散时滞切换系统(8), 如果存在对称正定矩阵 $X_1, \cdots, X_m, W \in \mathbf{R}^{n\times n}$, 矩阵 $Q_1, \cdots, Q_m \in \mathbf{R}^{p\times n}$, 使得 $\forall (i,j) \in M \times M$, 有标量 $\epsilon_{ij} > 0$,

$$\begin{bmatrix} -W & * & * & * & * \\ X_i & -X_i & * & * & * \\ 0 & 0 & W-2X_i & * & * \\ 0 & A_iX_i+B_iQ_i & A_{di}X_i & -X_j+\epsilon_{ij}D_iD_i^{\mathrm T} & * \\ 0 & E_{i1}X_i+E_{i3}Q_i & E_{i2}X_i & 0 & -\epsilon_{ij}I \end{bmatrix} < 0, \tag{10}$$

其中 * 表示对称部分. 那么存在状态反馈控制

$$K_i = Q_iX_i^{-1}, i \in M, \tag{11}$$

对于任意切换信号, 闭环系统(9) 是渐进稳定的.

**证明**　由定理 2, 不确定离散时滞切换系统(8) 对于任意切换方案, 存在无记忆状态反馈镇定的充分条件是存在对称正定矩阵 $X_1, \cdots, X_m, W \in \mathbf{R}^{n\times n}$, 矩阵 $Q_1, \cdots, Q_m \in \mathbf{R}^{p\times n}$, 使得 $\forall (i,j) \in M \times M$, 有

$$\begin{bmatrix} -W & * & * & * \\ X_i & -X_i & * & * \\ 0 & 0 & W-2X_i & * \\ 0 & \begin{matrix}(A_i+\Delta A_i)X_i + \\ (B_i+\Delta B_i)Q_i\end{matrix} & \begin{matrix}(A_{di}+ \\ \Delta A_{di})X_i\end{matrix} & -X_j \end{bmatrix} < 0,$$

$$\begin{bmatrix} -W & * & * & * \\ X_i & -X_i & * & * \\ 0 & 0 & W-2X_i & * \\ 0 & A_iX_i+B_iQ_i & A_{di}X_i & -X_j \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 & * & * & * \\ 0 & 0 & * & * \\ 0 & 0 & 0 & * \\ 0 & D_i\Gamma E_{i1}X_i + D_i\Gamma E_{i3}Q_i & D_i\Gamma E_{i2}X_i & 0 \end{bmatrix} < 0,$$

$$\begin{bmatrix} -W & * & * & * \\ X_i & -X_i & * & * \\ 0 & 0 & W-2X_i & * \\ 0 & A_iX_i+B_iQ_i & A_{di}X_i & -X_j \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ D_i \end{bmatrix} \Gamma [0 \quad E_{i1}X_i+E_{i3}Q_i \quad E_{i2}X_i \quad 0] +$$

$$[0 \quad E_{i1}X_i+E_{i3}Q_i \quad E_{i2}X_i \quad 0]^{\mathrm T}\Gamma^{\mathrm T} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ D_i \end{bmatrix}^{\mathrm T} < 0.$$

由引理 1, 上式成立的充分必要条件是存在 $\epsilon_{ij} > 0$, 使得

$$\begin{bmatrix} -W & * & * & * \\ X_i & -X_i & * & * \\ 0 & 0 & W-2X_i & * \\ 0 & A_iX_i+B_iQ_i & A_{di}X_i & -X_j \end{bmatrix} +$$

$$\epsilon_{ij} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ D_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ D_i \end{bmatrix}^{\mathrm T} +$$

$$\epsilon_{ij}^{-1}[0 \quad E_{i1}X_i+E_{i3}Q_i \quad E_{i2}X_i \quad 0]^{\mathrm T} \times$$
$$[0 \quad E_{i1}X_i+E_{i3}Q_i \quad E_{i2}X_i \quad 0] < 0.$$

利用 Schur 补, 有

$$\begin{bmatrix} -W & X_i & 0 \\ X_i & -X_i & 0 \\ 0 & 0 & W-2X_i \\ 0 & A_iX_i+B_iQ_i & A_{di}X_i \\ 0 & E_{i1}X_i+E_{i3}Q_i & E_{i2}X_i \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$
\leftarrow
\begin{array}{cc}
0 & 0 \\
(A_i X_i + B_i Q_i)^{\mathrm{T}} & (E_{i1} X_i + E_{i3} Q_i)^{\mathrm{T}} \\
X_i A_{di}^{\mathrm{T}} & X_i E_{i2}^{\mathrm{T}} \\
-X_j + \epsilon_{ij} D_i D_i^{\mathrm{T}} & 0 \\
0 & -\epsilon_{ij} I
\end{array}
\left.\vphantom{\begin{array}{c}0\\0\\0\\0\\0\end{array}}\right] < 0. \square
$$

## 6 仿真算例

考虑如下由两个开环不稳定子系统构成的不确定离散时滞切换系统, $i \in \{1, 2\}$, 其中 $d = 2$, 采样时间为 0.1 s, 系统的各常数矩阵如下:

$$
A_1 = \begin{bmatrix} 0.40 & 0.08 \\ -0.50 & -0.41 \end{bmatrix},
$$

$$
A_{21} = \begin{bmatrix} 0.50 & -0.31 \\ -0.34 & -0.30 \end{bmatrix},
$$

$$
B_1 = \begin{bmatrix} 0.23 \\ 0 \end{bmatrix}, D_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \end{bmatrix},
$$

$$
E_{11} = [0.03 \quad 0.04],
$$

$$
E_{12} = [-0.01 \quad 0.02],
$$

$$
E_{13} = [-0.05],
$$

$$
A_2 = \begin{bmatrix} -0.62 & 0.31 \\ -0.43 & 0.66 \end{bmatrix},
$$

$$
A_{22} = \begin{bmatrix} 0.29 & -0.41 \\ 0.42 & 0.38 \end{bmatrix},
$$

$$
B_2 = \begin{bmatrix} 0.37 \\ 0.31 \end{bmatrix}, D_2 = \begin{bmatrix} 2 \\ 1 \end{bmatrix},
$$

$$
E_{21} = [0.05 \quad -0.01],
$$

$$
E_{22} = [-0.02 \quad 0.02],
$$

$$
E_{23} = [-0.01], \Gamma = \sin(k).
$$

按照定理 3 中的方法, 由 Matlab7.01 中的 LMI 工具箱求得状态反馈控制如下:

$$
K_1 = [-0.37 \quad 0.61]; K_2 = [1.64 \quad -1.21].
$$

为了验证系统在任意切换信号作用下是渐进稳定的, 构造一个随机切换信号对系统进行切换, 取 $x(0) = \begin{bmatrix} 5 \\ -5 \end{bmatrix}$, 仿真结果如图 1 和图 2 所示. 由图可以看出, 系统在切换信号作用下是渐进稳定的.

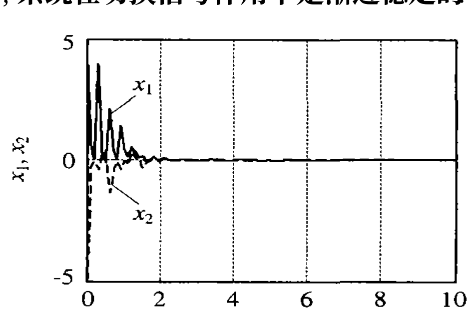


**图 1 离散切换系统的状态曲线图**

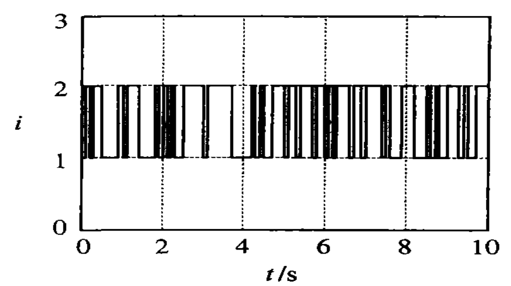


**图 2 系统的随机切换信号**

## 7 结 语

本文研究了任意切换信号作用下离散时滞切换系统的稳定性和状态反馈镇定问题. 基于多李雅普诺夫函数法, 首先以 LMI 形式给出了在任意切换信号作用下系统渐进稳定的一个充分性条件; 然后给出了系统状态反馈镇定的控制器设计方案, 并将其推广到不确定离散时滞切换系统; 最后通过一个仿真算例表明了设计方案的可行性, 从而为时滞切换系统的镇定提供了一种有效方法.

### 参考文献(References)

[1] Decarlo R A, Branicky M S, Pettersson S, et al. Perspectives and Results on the Stability and Stabilizability of Hybrid System [J]. *Proc of the IEEE*, 2000, 88(7): 1069-1082.

[2] Branicky M S. Multiple Lyapunov Functions and Other Analysis Tools for Switched and Hybrid Systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(4): 475-482.

[3] Liberzon D, Morse A S. Basic Problems in Stability and Design of Switched Systems [J]. *IEEE Control System Magazine*, 1999, 19(5): 59-70.

[4] Daafouz J, Riedinger P, Iung C. Stability Analysis and Control Synthesis for Switched Systems: A Switched Lyapunov Function Approach [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2002, 47(11): 1883-1887.

[5] Ji Z, Wang L, Xie G, et al. Linear Matrix Inequality Approach to Quadratic Stabilisation of Switched Systems [J]. *IEE Proc on Control Theory and Applications*, 2004, 151(3): 289-294.

[6] Song Y, Xiang Z, Chen Q, et al. Dynamic Output Feedback Control of Discrete Switched System with Time Delay [A]. *Proce of 5th World Congress on Intelligent Control and Automation* [C]. Hangzhou, 2004: 1088-1091.

[7] Zhai G S, Sun Y, Chen X K, et al. Stability and $L_2$ Gain Analysis for Switched Symmetric Systems with Time Delay [A]. *Proc of the 2003 American Control Conf* [C]. Denver: IEEE, 2003: 2682-2687.

(下转第 952 页)

## 4 结 语

本文提出了一种针对超 3G 网络切换中小区选择的智能控制方案. 此方案针对超 3G 网络自身多接入技术和业务类型的特点, 采用与业务QoS 密切相关的小区类型、数据速率、覆盖范围、传输延时和呼叫到达率作为评价指标, 并用模糊多目标判决算法进行小区选择决策. 针对所提出的方案, 本文给出了实时高带宽业务和非实时低带宽业务的实例分析和仿真. 实例分析中, 本文方案在移动主机运行不同业务情况时作出了不同的小区选择. 仿真结果表明, 本文方案所作出的选择是正确的, 有效地保障了切换后移动主机获得最优的服务质量.

### 参考文献(References)


[1] Mohr W. Further Developments Beyond Third Generation Mobile Communications[A]. *Int Conf on Communication Technology Proc*[C]. Beijing, 2000, 2: 1001-1008.

[2] Wang J, Liu J C L, Cen Y h. Handoff Algorithms in Dynamic Spreading WCDMA System Supporting Multimedia Traffic[J]. *IEEE J on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(10): 1652-1662.

[3] McNair J, Akyildiz I F, Bender M D. An Inter-system Handoff Technique for the IMT-2000 System[A]. *IEEE Infocom*[C]. Israel, 2000, 1: 208-216.

[4] Shafiq B, Ghafoor A, Baqai S, et al. Wireless Network Resource Management for Web-based Multimedia Document Services[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(3): 138-145.

[5] Istvan B. A Ranking Method for Multiple-criteria Decision Making[J]. *Int J of Systems Science*, 1997, 28(9): 905-912.

[6] Ashok K, Gopa K. Optimal System Selection in Fuzzy Environment[J]. *Int J of Systems Science*, 1998, 29(2): 609-616.

[7] Guenkova-Luy T, Kassler A J, Mandato D. End-to-end Quality-of-service Coordination for Mobile Multimedia Applications[J]. *IEEE J on Selected Areas in Communications*, 2004, 22(5): 889-903.

[8] Saaty T L. *The Analytic Hierarchy Process*[M]. New York: McGraw-Hill, 1980.


(上接第 944 页)


[8] Xie G M, Wang L. Quadratic Stability and Stabilization of Discrete-time Switched Systems with State Delay[A]. *Proc of 43rd IEEE Conf on Decision and Control*[C]. Atlantis, Paradise Island, Bahamas: IEEE, 2004: 3235-3240.

[9] Khargonekar P P, Petersen I R, Zhou, K. Robust Stabilization of Uncertain Linear Systems: Quadratic Stabilizability and $H_\infty$ Control Theory[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1990, 35(3): 356-361.

[10] Petersen I R. A Stabilization Algorithm for a Class of Uncertain Linear Systems[J]. *Systems & Control Letters*, 1987, 8(4): 351-357.

[11] 卢建宁, 赵光宙. 离散时滞切换系统稳定性分析[J]. *信息与控制*, 2005, 34(3): 381-384.
(Lu J N, Zhao G Z. Stability Analysis for Discrete Switched Systems with Time Delay[J]. *Information and Control*, 2005, 34(3): 381-384.)


(上接第 947 页)


[5] Schmidt R O. Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation[J]. *IEEE Trans on AP*, 1986, 34(3): 276-280.

[6] Roy R, Kailath T. ESPRIT-estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques[J]. *IEEE Trans on ASSP*, 1989, 37(7): 984-995.

[7] Kundu D. Modified MUSIC Algorithm for Estimating DOA of Signals[J]. *Signal Processing*, 1996, 48(1): 85-90.

[8] Haardt M, Nossek J A. Unitary ESPRIT: How to Obtain Increased Estimation Accuracy with a Reduced Computional Burden[J]. *IEEE Trans on SP*, 1995, 43(5): 1232-1242.

[9] Pesavento M, Gershman A B, Haardt M. Unitary Root MUSIC with a Real-valued Eigendecomposition: A Theoretical and Experimenttal Perfomance Study[J]. *IEEE Trans on SP*, 2000, 48(5): 1306-1314.