

8-17-2020

Analysis and Simulation of a Class of Time-varying Wireless Networked Control Systems

Weihua Deng

1. College of Electrical Engineering Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;;

Minrui Fei

2. Shanghai University, Shanghai 200072 China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Analysis and Simulation of a Class of Time-varying Wireless Networked Control Systems

Abstract

Abstract: The problem of stabilization was investigated for a class of discrete time-varying systems over a physical IEEE 802.11b wireless channel. *The wireless network-induced delays were characterized by an inverse Gaussian distribution model (IGDM) and the time-varying nature was depicted by uncertain parameter model. The model-based state feedback controller was designed to compensate the influence of delays and time-varying nature.* And the stochastic stabilisability of discrete time-varying networked control system was analyzed and the solution of controller was given in the form of linear matrix inequalities (LMIs). The effectiveness of the proposed methods was illustrated by numerical simulation examples.

Keywords

networked control system, time-varying system, inverse gaussian distribution model, model-based control

Recommended Citation

Deng Weihua, Fei Minrui. Analysis and Simulation of a Class of Time-varying Wireless Networked Control Systems[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(8): 1878-1883.

一类时变无线网络控制系统分析与仿真研究

邓玮璋¹, 费敏锐²

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 上海大学上海机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 研究了一类具有 IEEE802.11b 无线网络通道特性和时变特性的离散系统镇定及数值仿真问题。分别建立了刻画 IEEE802.11b 无线网络通道时滞的逆高斯分布模型和系统时变特性的不确定参数模型。设计了基于模型的状态反馈控制器以补偿网络延时和时变性对系统的影响。同时分析了离散时变网络控制系统的随机稳定性, 并给出了线性矩阵不等式形式的控制器求解条件。通过数值仿真分析, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 网络控制系统; 时变系统; 逆高斯分布模型; 基于模型的控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 08-1878-06

Analysis and Simulation of a Class of Time-varying Wireless Networked Control Systems

Deng Weihua¹, Fei Minrui²

(1. College of Electrical Engineering Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Shanghai University, Shanghai 200072 China)

Abstract: The problem of stabilization was investigated for a class of discrete time-varying systems over a physical IEEE 802.11b wireless channel. The wireless network-induced delays were characterized by an inverse Gaussian distribution model (IGDM) and the time-varying nature was depicted by uncertain parameter model. The model-based state feedback controller was designed to compensate the influence of delays and time-varying nature. And the stochastic stabilisability of discrete time-varying networked control system was analyzed and the solution of controller was given in the form of linear matrix inequalities (LMIs). The effectiveness of the proposed methods was illustrated by numerical simulation examples.

Keywords: networked control system; time-varying system; inverse gaussian distribution model; model-based control

引言

由于网络控制系统^[1-3]具有信息交互快速、经济成本低, 系统易维护及操作灵活等优点, 在当下越来越受到人们的关注。根据文献[1]给出的概念, 网络控制系统通过一个通信网络将传感器、控制器

和执行器连接而成, 并且这些器件通过共享该通信网络而彼此交互信息。和传统的控制系统相比, 通信网络是网络控制系统中必须考虑的重要问题, 因为通信网络的介入会给整个系统的稳定性和镇定等带来诸多影响。如何利用好网络控制系统的优势, 又尽可能的抑制这些影响成为这一科学领域关注的问题。围绕这一问题, 许多科技文献开展了相关的研究和探索。基于作者的调查, 目前的研究大致分为以下几个类型: 着重关注网络特性, 如网络诱导时滞、网络丢包及网络协议等, 并假设其满足



收稿日期: 2014-12-24 修回日期: 2015-03-08;
基金项目: 上海市自然科学基金(15ZR1417500), 上海市教委资助项目(ZZsdl13008; CXYsdl1401), 上海市科委重大基础研究项目(14JC1402200);
作者简介: 邓玮璋(1978-), 男, 山西太原, 博士, 副教授, 研究方向为网络化控制、微网控制等。

<http://www.china-simulation.com>

• 1878 •

一定的条件下分析系统的稳定性或设计相应的控制方法进行补偿, 可参考文献[4-5]; 着重关注通信特性, 如量化、通道信噪比及数据率等对系统稳定性的影响, 可参考文献[6-7]; 将被控对象特性, 如不确定性、时变性等分别与以上两方面特性共同考虑, 研究系统的稳定及镇定问题, 可参考文献[8-10]。本分主要关注第三类, 同时考虑被控对象特性即时变性和网络特性即网络诱导时滞, 研究系统在此两种因素影响下的镇定条件。

将被控对象特性和网络或通信特性综合考虑研究网络控制系统稳定或镇定已受到广泛的关注。文献[8]考虑了具有不确定参数模型的时变特性和马尔科夫模型的网络诱导时滞, 使用状态反馈控制方法保证了系统的镇定; 文献[9]同时考虑具有不确定参数模型的时变特性和一致量化器诱导的输入量化误差, 设计了 H2 控制方法保证了系统的渐进稳定; 文献[10]考虑了具有多胞型不确定模型的时变特性和具有上下界的网络丢包及时滞特性, 研究了系统的 H_{∞} 估计问题等等。以上研究大多考虑的是有线网络特性, 而较少关注无线网络。文献[11-12]考虑了 IEEE802.11b 无线网络通道特性, 并设计了基于模型的控制方法抑制网络时滞, 但是被控对象是时不变的。基于作者的了解, 目前针对 IEEE802.11b 无线网络通道的离散时变网络控制系统的镇定问题的研究还比较少。因此, 本文在以前相关工作^[5,7,11-12]的基础上, 进一步将研究问题拓展到离散时变网络控制系统。但是时变特性和网络诱导时滞同时引入给系统的稳定分析和控制器设计都带来了新的困难。首先是对象时变不确定性的引入增加了稳定性证明的复杂度, 另外如何设计控制器既能承受系统被控对象在一定范围内的变化, 又能抑制无线网络时滞的影响也具有一定挑战。针对以上困难, 本文采用了以下两个技巧: 将确定模型和不确定模型先分离再重新组合进行稳定性证明, 即先将含有网络随机变量的部分分离, 然后再进一步重新组合后将含有时变变量的部分分离。这样可以简化并完成证明过程; 根据实际环

境设计一个网络时滞界限, 将网络时滞问题转化为丢包问题, 设计基于模型的控制对丢失的数据包进行重构。这样可以在对象一定的时变范围内有效的补偿网络时滞的影响。

1 问题描述

此部分给出整体系统的描述。本文研究的离散时变网络控制系统如示意图 1, 时变对象和执行器及传感器打包在一个模块中, 系统状态将通过 IEEE802.11b 无线网络通道传送到控制器模块, 随后控制器计算好控制输入由理想传输线路传送到执行器。另外本文假设传感器是时间驱动, 而控制器和执行器是事件驱动。

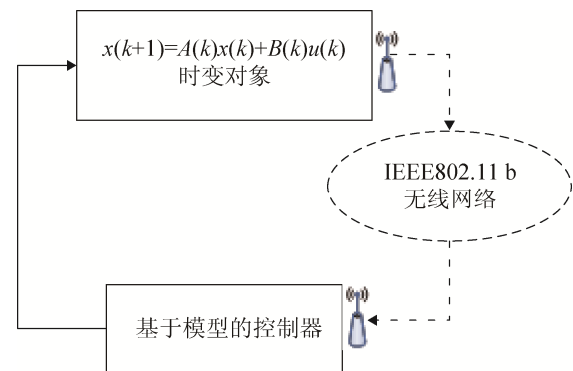


图 1 离散时变网络控制系统结构示意图

结合图 1, 系统各部分描述如下:

离散时变系统: 离散时变系统表示为

$$x(k+1) = A(k)x(k) + B(k)u(k) \quad (1)$$

其中: $x(k)$ 是系统状态变量; $u(k)$ 是控制输入;

$A(k)$, $B(k)$ 代表对象的时变特性并满足:

$$\begin{aligned} A(k) &= A + \Delta A(k), \quad B(k) = B + \Delta B(k) \\ [\Delta A(k) \quad \Delta B(k)] &= DF(k)[E_1 \quad E_2] \\ F^T(k)F(k) &\leq I \end{aligned} \quad (2)$$

注 1: 公式(2)中所描述的不确定形式是目前大多数文献研究系统不确定所采用的一种形式, 由于这种形式较为成熟, 故本文也采用此种描述形式。

无线网络诱导时滞: 这里采用的无线网络时滞是基于 IEEE802.11b 无线网络通道而产生的。网络

时滞模型由逆高斯分布模型刻画, 即 $\tau(k) \sim IG(\mu, \lambda)$, 其中 μ, λ 分别是均值和形态参数, 它的累积分布函数为

$$F(\tau(k)) = \Phi\left(\sqrt{\frac{\lambda}{\tau(k)}}\left(\frac{\tau(k)}{\mu} - 1\right)\right) + \exp\left(\frac{2\lambda}{\tau(k)}\right)\Phi\left(-\sqrt{\frac{\lambda}{\tau(k)}}\left(\frac{\tau(k)}{\mu} + 1\right)\right) \quad (3)$$

注 2: 公式(3)是逆高斯分布的分布函数形式, 是概率与数理统计中常见的一种分布形式。由于这类分布模型是 IEEE802.11b 无线网络通道时滞的有效拟合, 详细内容可参考文献[11], 故本文仍然沿用这类分布描述无线网络时滞特性。

使用以下技巧可以将时滞问题转化为丢包。首先使用公式(3)求解以下概率

$$\Pr(\tau(k) \leq \tau^*) = p$$

$$\Pr(\tau(k) > \tau^*) = 1 - p$$

其中, τ^* 假设为控制器所容许的最大时滞, $0 < p < 1$ 。定义指标函数

$$\theta(k) = \begin{cases} 1, & \tau(k) \leq \tau^* \\ 0, & \tau(k) > \tau^* \end{cases} \quad (4)$$

其中: 随机变量 $\theta(k) = 1$ 代表状态信号在 τ^* 前到达, 否则将视为数据包丢失。这样可以得到下式

$$\Pr(\theta(k) = 1) = p \quad (5)$$

$$\Pr(\theta(k) = 0) = 1 - p$$

基于模型的控制器: 为了补偿网络时滞带来的影响, 这里采用基于模型的反馈控制器^[13]。其主要思想是采用上文所提出的第二个技巧: 如果状态信息在控制器所容许的时滞 τ^* 以前到达, 则反馈控制器采用该信息, 否则采用由对象模型(6)产生的状态 $\hat{x}(k)$ 。首先系统对象模型给定如下

$$\hat{x}(k+1) = \hat{A}\hat{x}(k) + \hat{B}u(k) \quad (6)$$

其中: $\hat{x}(k)$ 是模型的状态, $\hat{A}, \hat{B}$ 是已知合适维数的常矩阵。对象模型可以采用文献[12]中的迭代辨识方法得到。结合系统(1), 模型(6)和指标函数(4), 反馈控制器设计如下

$$u(k) = K[\theta(k)x(k) + (1 - \theta(k))\hat{x}(k)] \quad (7)$$

其中 K 是待定的控制器增益。

注 3: 公式(7)是本文在以前工作基础上的一个拓展, 这类控制器设计可以有效补偿网络丢包。

离散时变网络控制系统: 将以上控制器(7)代入系统(1), 并结合模型(6), 使用增广矩阵方法可以得到以下离散时变网络控制系统

$$z(k+1) = \bar{A}(k)z(k) \quad (8)$$

其中: $z(k) = \begin{bmatrix} e(k) \\ x(k) \end{bmatrix}$, $e(k) = x(k) - \hat{x}(k)$, $\bar{A}(k)$ 见下文。下面给出系统随机稳定^[4]的定义。

定义 1: 如果对于有限的初始状态 $z(0)$, 存在矩阵 $W > 0$ 使得以下条件满足

$$E\left\{\sum_{k=0}^{\infty} \|z(k)\|^2 \mid z(0)\right\} < z^T(0)Wz(0) \quad (9)$$

其中: $E\{\cdot\}$ 代表数学期望, 则系统(8)是随机稳定的。

2 基于模型的控制器设计

这部分进行基于模型的控制器设计, 设计的主导思想是基于 Lyapunov 稳定理论, 找到状态反馈控制器增益存在的一个充分条件, 并且将此条件转换为线性矩阵不等式形式以方便对控制器增益进行求解。定理 1 将给出找到控制器增益的方法, 在给出定理 1 之前先给出以下引理 1。该引理经常被用于时变不确定系统的稳定证明。

引理 1^[8]: 对于合适维数的常矩阵 D, E 和标量 $\varepsilon > 0$, 以下不等式满足

$$DFE + E^T F^T D^T \leq \varepsilon DD^T + \varepsilon^{-1} E^T E \quad (10)$$

其中: F 满足 $FF^T \leq I$ 。

下面给出定理 1。

定理 1: 考虑系统(8), 其满足不确定模型(2)和网络时滞(3)。若存在对称矩阵 $Q > 0$, 矩阵 K_1, K_2, K_3 和正标量 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 使得如下关系式成立

$$\Theta < 0 \quad (11)$$

其中

$$\bar{D}_{12} = \begin{bmatrix} -\sqrt{(1-p/p)}DD^T & -\sqrt{(1-p/p)}DD^T \\ -\sqrt{(1-p/p)}DD^T & -\sqrt{(1-p/p)}DD^T \end{bmatrix}$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} -Q & * & * \\ B^1 K_1 & -Q + \varepsilon_1 \bar{D}_{11} & * \\ A^1 Q - B^1 K_2 + p B^1 K_1 & \varepsilon_1 \bar{D}_{12} & - \\ \sqrt{p(1-p)} E_2 K_1 & 0 & * \\ E^1 Q + E_2 K_3 & 0 & * \\ * & * & * \\ * & * & * \\ Q + \varepsilon_1 \bar{D}_{13} + \varepsilon_2 \bar{D}_{21} & * & * \\ 0 & -\varepsilon_1 I & * \\ 0 & 0 & -\varepsilon_2 I \end{bmatrix}$$

$$E^1 = \begin{bmatrix} 0 & E_1 \end{bmatrix}, \bar{D}_{13} = \begin{bmatrix} \frac{1-p}{p} DD^T & \frac{1-p}{p} DD^T \\ \frac{1-p}{p} DD^T & \frac{1-p}{p} DD^T \end{bmatrix}$$

$$\bar{D}_{21} = \begin{bmatrix} DD^T & DD^T \\ DD^T & DD^T \end{bmatrix}, \bar{D}_{11} = \begin{bmatrix} DD^T & DD^T \\ DD^T & DD^T \end{bmatrix}$$

$$B^1 = \begin{bmatrix} B - \hat{B} \\ B \end{bmatrix}, A^1 = \begin{bmatrix} \hat{A} & A - \hat{A} \\ 0 & A \end{bmatrix}$$

那么对于不确定模型(2)和网络时滞(3), 控制器(7)可以保证系统(8)随机稳定。

证明: 选取 Lyapunov 函数

$$V(k, z(k)) = z^T(k) P z(k) \quad (12)$$

其中: $P > 0$ 是对称正定矩阵。沿着系统(8)的任意轨迹, (12)式的前向差分 and 期望如下

$$E(\Delta V(k, z(k)) | z(k)) = E(z^T(k+1) P z(k+1) | z(k)) - z^T(k) P z(k) \quad (13)$$

下面针对系统(8), 采用上文提出的第一个技巧, 首先进行第一次分离, 即将含有随机变量 $\theta(k)$ 的部分分离后得到

$$\bar{A}(k) = A_1(k) + \theta(k) A_2(k) \quad (14)$$

其中

$$A_1(k) = \begin{bmatrix} -(B + \Delta B(k))K + \hat{A} + \hat{B}K - (B + \Delta B(k))K \\ A + \Delta A(k) + (B + \Delta B(k))K - \hat{A} - \hat{B}K \\ A + \Delta A(k) + (B + \Delta B(k))K \end{bmatrix}$$

$$A_2(k) = \begin{bmatrix} (B + \Delta B(k))K - \hat{B}K & 0 \\ (B + \Delta B(k))K & 0 \end{bmatrix}$$

将(14)代入(13), 结合(5)并通过简单的代数变换得

$$E(\Delta V(k, z(k)) | z(k)) = z^T(k) [(A_1(k) + p A_2(k))^T P (A_1(k) + p A_2(k)) + p A_2(k) + p(1-p) A_2^T(k) P A_2(k) - P] z(k) \quad (15)$$

然后针对等式(15)右边, 继续第二次分离, 即对含有不确定变量 $F(k)$ 的部分进行分离得到

$$(A_1(k) + p A_2(k))^T P (A_1(k) + p A_2(k)) + p(1-p) A_2^T(k) P A_2(k) - P = [A_1 + \Delta A_1(k) + p(A_2 + \Delta A_2(k))]^T P \times [A_1 + \Delta A_1(k) + p(A_2 + \Delta A_2(k))] + p(1-p)[A_2 + \Delta A_2(k)]^T P (A_2 + \Delta A_2(k)) - P$$

其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} -BK + \hat{A} + \hat{B}K & A + BK - \hat{A} - \hat{B}K \\ -BK & A + BK \end{bmatrix}$$

$$\Delta A_1(k) = \begin{bmatrix} -\Delta B(k)K & \Delta A(k) + \Delta B(k)K \\ -\Delta B(k)K & \Delta A(k) + \Delta B(k)K \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} BK - \hat{B}K & 0 \\ BK & 0 \end{bmatrix}, \Delta A_2(k) = \begin{bmatrix} \Delta B(k)K & 0 \\ \Delta B(k)K & 0 \end{bmatrix}$$

将上式代入(15)并经过代数变换后, 等式右侧为

$$\begin{bmatrix} -P & * & * \\ \sqrt{p(1-p)} A_2 & -P^{-1} & * \\ A_1 + p A_2 & 0 & -P^{-1} \end{bmatrix} + \bar{D}_1 F(k) \bar{E}_1 + \bar{D}_2 F(k) \bar{E}_2 + [\bar{D}_1 F(k) \bar{E}_1 + \bar{D}_2 F(k) \bar{E}_2]^T$$

其中

$$\bar{D}_1^T = \begin{bmatrix} 0 & D & D & -\sqrt{\frac{1-p}{p}} D & -\sqrt{\frac{1-p}{p}} D \end{bmatrix}$$

$$\bar{D}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & D^T & D^T \end{bmatrix}^T$$

$$\bar{E}_1 = \begin{bmatrix} \sqrt{p(1-p)} E_2 K & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{E}_2 = \begin{bmatrix} 0 & E_1 + E_2 K & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

对于标量 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 应用引理 1, 并且做矩阵变量代换 $Q = P^{-1}, K_1 = [K \ 0] P^{-1}, K_2 = [K \ -K] P^{-1}, K_3 = [0 \ K] P^{-1}$ 可以得到(11), 这样容易得到

$$E\left\{\sum_{k=0}^{\infty}\|z(k)\|^2\mid z(0)\right\}<z^T(0)Wz(0), W=\frac{1}{\rho}P$$

由此并根据定义 1 定理得证。

3 数值仿真

这部分通过两个数值仿真例子对上述结果进行仿真验证。这一部分的实验数据主要来自以前的工作^[11-12]和文献[14]。为了论述完整性,再次陈述如下:在仿真中将 90%的时滞小于等 2T 的情形定义为较好的网络通道条件,将 90%的时滞小于等 4T 的情形定义为较差的网络通道条件。其中 T 为采样周期在仿真中选取为 10ms。假设 $\tau^*=1T$, μ, λ 分别为 8.24 和 1.80 对应于好的网络通道条件, μ, λ 分别为 9.24 和 1.80 对应于较差的网络通道条件,那么根据(3)可以分别计算得到相应的概率值为 $p=0.8052$ 和 $p=0.7322$ 。

例 1: 本例中的主要参数选自文献[14]。系统(1)的相应参数如下

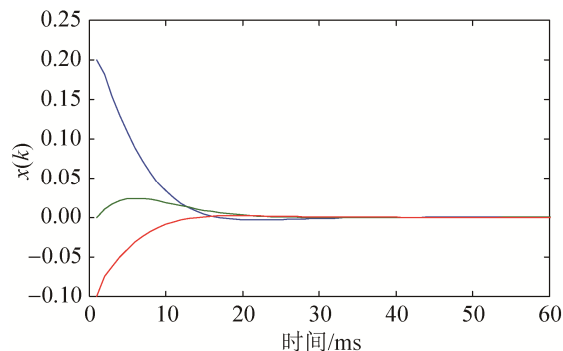
$$A=\begin{bmatrix} 0.7 & 0 & -0.5 \\ 0.05 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.6 \end{bmatrix}, B=\begin{bmatrix} 0.3 \\ 0 \\ 0.6 \end{bmatrix}, D=\begin{bmatrix} 0.1 \\ 0 \\ 0.2 \end{bmatrix}$$

$$E_1=[0.2 \ 0 \ 0.3], E_2=0.4$$

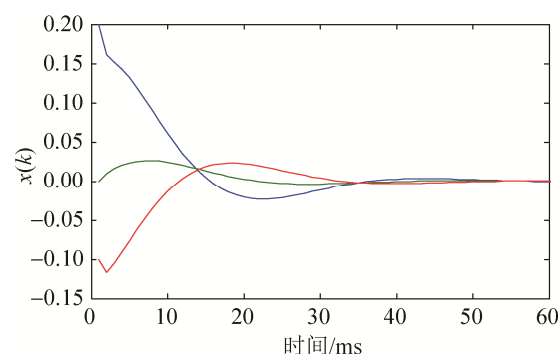
系统模型(6)的相应参数假设是(1)的确定部分,即

$$\hat{A}=\begin{bmatrix} 0.7 & 0 & -0.5 \\ 0.05 & 0.8 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.6 \end{bmatrix}, \hat{B}=\begin{bmatrix} 0.3 \\ 0 \\ 0.6 \end{bmatrix},$$

使用 Matlab 工具箱 lmitools, 通过求解线性矩阵不等式 (11) 可以得到控制器增益 $K=[-0.500 \ 0 \ -0.000 \ 0 \ -0.750 \ 0]$ 。若选取 $F(k)=\sin k$, 初始状态 $x(0)=[0.2 \ 0 \ -0.1]^T$, 使用 Matlab 工具箱 simulink 进行数值仿真可以得到系统状态响应如图 2。比较图 2(a)和(b)可以看出,系统(1)在两类网络通道环境下均可以达到稳定,通道条件较差时曲线抖动也较严重,并且达到稳定的时间也较长。



(a) 较好的网络通道条件



(b) 较差的网络通道条件

图 2 系统状态响应曲线

例 2: 本例中的主要参数是在文献[11]中的仿真例子的基础上经过合理的变化得到系统(1)的相应参数如下

$$A=\begin{bmatrix} 0.299 \ 6 & 0.199 \ 8 & -0.299 \ 6 \\ 1.000 \ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.000 \ 0 & 0 \end{bmatrix}, B=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

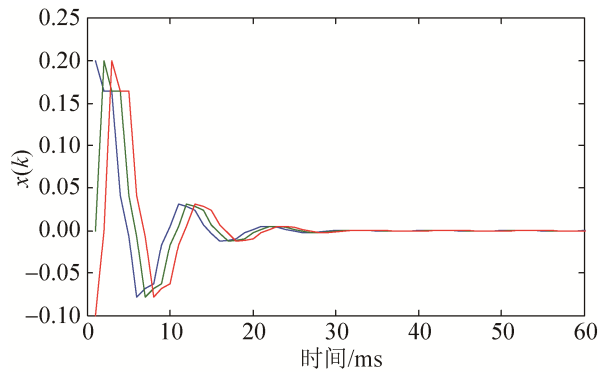
$$D=[1 \ 0 \ 0]^T$$

$$E_1=[0.04 \ 0.02 \ -0.04], E_2=0$$

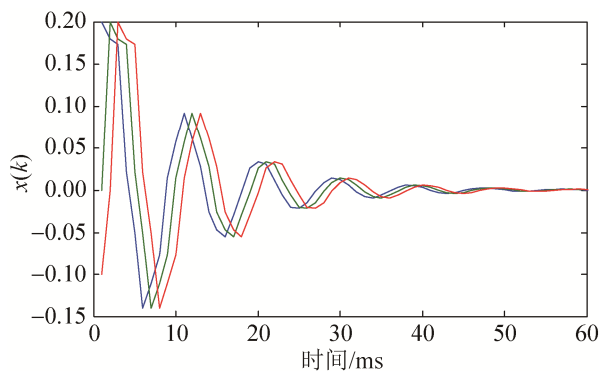
模型(6)的参数同样选为系统(1)的确定部分,如下

$$\hat{A}=\begin{bmatrix} 0.299 \ 6 & 0.199 \ 8 & -0.299 \ 6 \\ 1.000 \ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.000 \ 0 & 0 \end{bmatrix}, \hat{B}=\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

使用类似例 1 的方法同样可以得到控制器增益 $K=[0.252 \ 1 \ 0.176 \ 1 \ -0.259 \ 1]$ 。若选取 $F(k)=0.8\sin k$, 初始状态与例 1 相同。从图 3 中可以看出,系统在两种网络环境下均可以达到稳定,在较好的网络环境下抖动相对少并且达到稳定的时间也相对短,在较差的网络环境下正好相反。



(a) 较好的网络通道条件



(b) 较差的网络通道条件

图 3 系统状态响应曲线

4 结论

首先针对系统不确定和 IEEE802.11b 无线网络通道分别建立了不确定参数模型和逆高斯分布模型,然后设计了基于模型的状态反馈控制器使系统达到随机稳定。使用分离变量的技巧得到了求解控制器增益的线性矩阵不等式条件,最后的两个数值仿真例子验证了所提方法的有效性。本文只考虑了传感器与控制器之间具有无线网络的情形,并且假设所有状态是以一个数据包传递的,在此基础上研究的方法还不能满足实际应用的需要。我们下一步将进行多传感器和多通道网络控制系统的分析和仿真研究。

参考文献:

- [1] Hespanha J, Naghshtabrizi P, Xu Y. A survey of recent results in networked control systems [J]. Proceedings of the IEEE (S0018-9219), 2007, 95(1): 138-162.
- [2] James R M, Dawan M T. The Emergence of industrial control networks for manufacturing control, diagnostics, and safety data [J]. Proceedings of the IEEE (S0018-9219), 2007, 95(1): 29-47.
- [3] F Farokhi, K H Johansson. Stochastic sensor scheduling for networked control systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2014, 59(5): 1147-1163.
- [4] Gao H J, Meng X Y, Chen T W. Stabilization of networked control systems with a new delay characterization [J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2008, 53(9): 2142-2148.
- [5] 邓玮瑾, 费敏锐. 非线性网络控制系统的 T-S 模糊 H_∞ 控制与数值仿真 [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(7): 1651-1659.
- [6] Braslavsky Middleton Freudenberg. Feedback stabilization over signal-to-noise ratio constrained channels [J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2007, 52(8): 1391-1403.
- [7] 邓玮瑾, 费敏锐, 宋杨. 基于信噪比受限通道的网络控制系统镇定 [J]. 控制与决策, 2012, 27(1): 58-64.
- [8] Dan Huang, Sing Kiong Nguang. State feedback control of uncertain networked control systems with random time delays [J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2008, 53(3): 829-834.
- [9] Sung Wook Yun, Yun Jong Choi, PooGyeon Park. H_2 control of continuous-time uncertain linear systems with input quantization and matched disturbances [J]. Automatica (S0005-1098), 2009, 45: 2435-2439.
- [10] Gao H J, Chen T W. H-infinity estimation for uncertain systems with limited communication capacity [J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2007, 52(11): 2070-2084.
- [11] Deng W H, Li K, Irwin G W, et al. Identification and control of Hammerstein systems via wireless networks [J]. International Journal of Systems Science (S0020-7179), 2013, 44(9): 1613-1625.
- [12] Deng W H, Li K, Fei M R. Identification and output tracking control of Hammerstein systems through wireless networks [J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control (S0142-3312), 2014, 36(1): 3-13.
- [13] Luis A Montestruque, Panos J Antsaklis. On the model-based control of networked systems [J]. Automatica (S0005-1098), 2003, 39(5): 1837-1843.
- [14] 俞立. 鲁棒控制--线性矩阵不等式处理方法 [M]. 北京:清华大学出版社, 2002.