

文章编号: 1001-0920(2004)09-0961-06

网络化控制系统的科学问题与应用展望

陈幼平, 陈冰, 谢经明, 艾武, 周祖德
(华中科技大学 国家数控工程研究中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: 作为在串行网络上实现反馈控制回路的控制系统, 网络化控制系统减少了系统布线, 增加了系统的柔性, 提高了系统的可诊断性和可维护性。在综述网络化控制系统研究现状与进展的基础上, 对网络化控制系统所涉及的科学问题和应用领域进行了深入分析, 并对网络化控制系统的未来发展作了展望。

关键词: 网络化控制系统; 控制网络; 实时调度; 时滞系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Scientific problems and application prospects of the networked control systems

CHEN You-ping, CHEN Bing, XIE Jing-ming, AI Wu, ZHOU Zu-de

(National Numerical Control Engineering Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China. Correspondent: CHEN Bing, E-mail: chen-bing@263.net)

Abstract: As a control system with a feedback control loop based on serial network, the networked control system possesses the primary advantages of the reduced system wiring, the increased system flexibility, and the convenient system diagnosis and maintenance. On the basis of the synthetical description of the research progress and presence of networked control systems, the related scientific problems and applications are analyzed in detail, and its prospects in the future are proposed also.

Key words: networked control systems; control networks; real-time scheduling; time-delay systems

1 引言

控制对象的日益复杂化以及计算机、通信和传感技术的迅猛发展, 使得现代控制系统的结构逐渐趋于分布化。近年来, 网络化控制系统(NCS)已成为学术界和工业界的研究热点之一。将网络集成到控制系统中取代传统的计算机控制系统中的点对点连线具有很多优点, 如: 布线成本的降低, 电缆重量的减少, 安装过程的简化以及可靠性的提高等。由此, 便于实现系统的诊断和维护, 同时也可提高系统的柔性。但是, 在反馈控制回路中加入通信网络的同时, 也增加了控制系统分析和设计的复杂性。因此,

网络化控制系统必须解决的关键问题之一, 就是在网络带宽有限的情况下如何保证控制系统的实时性与稳定性。

若要解决这一问题, 需要进行一种跨学科的研究。网络化控制系统涉及到控制论、信息论、计算机科学、机械电子工程、软件工程、可靠性理论等多种学科领域。其中控制理论、计算机科学、信息论是系统分析的理论基础, 而机械电子工程、软件工程、可靠性理论则是为工程实现中的设计方法提供指导。信息论的奠基人 Shannon 早在 1973 年就前瞻性地认识到这一跨学科研究的必要性^[1]。他指出, 实时间

收稿日期: 2003-09-02; 修回日期: 2003-11-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60204004); 武汉市科技攻关项目(20001010094)。

作者简介: 陈幼平(1957—), 男, 江西高安人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制和网络化制造的研究; 陈冰(1977—), 男, 黑龙江青冈人, 博士生, 从事网络化实时控制系统的研究。

题和反馈问题在信息论研究中需要引起足够的注意,而实时系统和反馈系统传统上分别属于计算机科学和控制理论的研究领域。Astrom 等著名学者在最近的一份报告中指出,控制、计算和通信的集成将是控制学科一个重要的发展方向^[2]。而网络化控制系统的研究则是这一发展方向的具体体现。

本文首先简要介绍网络化控制系统的定义和发展,然后从计算机科学、控制理论、信息论等不同的视角来阐述网络化控制系统所涉及的科学问题,最后给出网络化控制系统的应用领域和发展前景。

2 网络化控制系统的定义与发展

所谓网络化控制系统,是指在串行网络上实现控制回路的系统,即控制系统中的控制器、传感器和执行器等元件通过串行网络来交换控制及传感等信号。

始于 20 世纪 50 年代的计算机控制系统,因其体积大、功耗高、可靠性差,使之在控制系统中的应用很有限,大多工作在监控模式下。在随后出现的直接数字控制(DDC)系统中,计算机则成为控制回路的一部分。如图 1 所示的 DDC 系统中,过程控制的模拟仪表被一台计算机取代,带模拟量输出的传感器和带模拟量输入的执行器与计算机之间采用点对点连接。过程信号的传感、计算与执行都在计算机控制下进行。

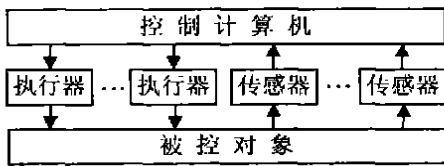


图 1 直接数字控制系统

随着计算机技术的快速发展和控制系统规模的增大,越来越需要计算能力的分布化。Honeywell 在 1975 年开发出第一个分布式控制系统(DCS)TDC2000。在如图 2 所示的 DCS 系统中,控制几台

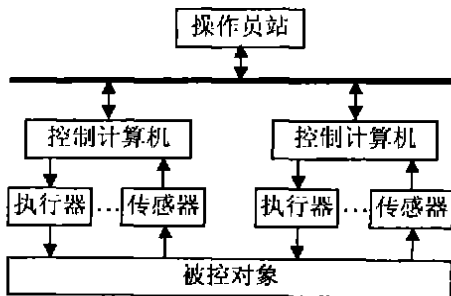


图 2 分布式控制系统

计算机作为过程工作站用来控制工业过程,操作员站和各种辅助工作站用来监视和保存过程数据以及进行过程优化。传感器和执行器直接连接到控制计算机上,只有开关信号、监视信息、警报信息等通过串行网络传输。

到了 20 世纪 90 年代,微处理器的发展对计算机在控制中的应用产生了深刻影响。随着 ASIC 芯片设计技术的发展和硅片价格的下降,传感器和执行器可以带有网络接口,并成为实时控制网络中的独立节点,这导致了 NCS 的出现。在如图 3 所示的 NCS 中,所有的控制器、传感器、执行器共享同一串行网络。

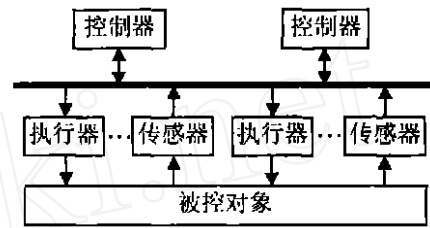


图 3 网络化控制系统

控制网络是网络化控制系统的核心,与数据网络相比,它具有数据帧短、数据交换频繁、有实时约束等特点。近 20 年来,控制网络获得迅速发展,特别是作为其主流的现场总线技术已形成了一系列国际标准,比较有影响的有 CAN, FIP, FF, PROFIBUS 等。文献[3]介绍了现场总线标准化的主要过程,文献[4]介绍了控制网络的基本概念、网络结构和特性等。

3 相关的科学问题

3.1 共享通信资源的实时优化调度

当多个控制回路连接到同一控制网络时,网络带宽的优化调度问题就变得格外重要。在计算机科学领域,单 CPU 或多 CPU 系统的实时调度算法已得到充分的研究,但对网络化控制系统来说,调度算法不仅要满足可调度性,还要满足控制系统的稳定性。

假设有 n 个线性时不变子系统共享同一网络带宽,且相互之间存在耦合,每个子系统的模型可描述为

$$\begin{aligned}
 x_i(k+1) &= \sum_{j=1}^n A_{ij}x_j(k) + \sum_{j=1}^n B_{ij}u_j(k), \\
 y_i(k) &= C_i x_i(k).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

为使所有子系统都稳定并使整个系统性能尽可能最优,需要采取优化手段,即在各个子系统之间分

配共享的网络带宽

Brockett 提出了通信序列的概念^[5], 所谓通信序列是指网络上各个子系统访问网络的次序. 通过重复执行该序列来实现网络资源调度, 各个子系统在序列中出现的位置和次数不同, 整个系统的状态模型也随之变化. 每个通信序列对应着一个仿射子空间

$$A = A_0 + \sum_{i=1}^r \gamma_i A_i, \quad (2)$$

其中 γ_i 对应着反馈增益. 此类网络化控制系统的优化调度问题可分两步解决: 首先寻找一最优通信序列, 确定一仿射子空间; 然后再从仿射子空间中搜索使系统稳定的解, 确定系统的反馈增益. 凸优化理论为解决此类问题提供了可行的方法. 在离散情况下, 这一搜索问题属于 NP-hard 问题.

Hristu 沿着这一思路作了进一步的研究, 具体给出了从一通信序列推导对应的仿射子空间的过程, 然后通过搜索仿射子空间中谱半径最小的元素来优化系统性能, 搜索过程采用模拟退火算法^[6]. Rehbinder 和 Sanfridson 则把寻找最优通信序列问题转化为组合优化问题, 并采用穷举法进行求解^[7]. Lincoln 和 Bernhardsson 提出了一种更有效的搜索最优通信序列的算法, 这种算法使用动态规划方法高效地剪除搜索树, 避免了组合爆炸问题^[8].

前面给出的调度方法均为离线静态调度, 因其优化算法较为复杂, 难以在在线调度中使用. 当简化到网络上只有一个控制回路的情况时, 则可以考虑实现在线的动态调度. Liu 和 Layland^[9] 以及 Audsley^[10] 提出了实时计算机系统的 CPU 动态调度算法, 但这些算法不能直接应用于网络化控制系统的调度. Walsh 等提出了一种 TOD 动态调度方法^[11]. 在 TOD 调度算法中, 每个节点计算自己的误差 $e(t)$, 并根据误差大小修改发送报文的优先级, 误差越大, 优先级越高. 当两个传感器节点同时发送报文时, 优先级高的节点获得网络访问权, 而竞争失败的节点则不再重传这一报文, 下次传输时采用更新的传感数据.

3.2 带网络延迟的反馈控制系统设计

控制网络中所有节点在传送报文时需要通过网络调度, 因而要分时占用总线, 这就使得信息在传输过程中存在着延迟. 并且随着通信协议和网络中负载情况的变化, 该延迟是随机时变的, 从而影响了控制系统的性能甚至稳定性.

控制网络的介质访问控制 (MAC) 协议对控制

网络的延迟特性有很大影响. MAC 协议主要通过访问仲裁和传输控制使得网络中各个节点共享网络带宽. 控制网络采用的 MAC 协议主要有: TDMA, Token Bus, CSMA 等. Lian 讨论了几种流行控制网络的实时性能和静态网络参数, 如报文长度和数据速率的对比关系^[12]. Ray 和 Halevi 分析了基于 MAC 协议的网络延迟问题^[13, 14].

3.2.1 固定网络延迟

当把网络延迟看作是固定值时, 系统的分析和设计可以大大简化. Astrom 和 Wittenmark 分析了在反馈控制环路中存在固定时延的采样控制系统的性能^[15]. Branicky 等研究了网络延迟和系统采样速率之间的关系^[16], 给出了网络化控制系统稳定性区域与采样速率和网络延迟 (假设为常数) 的关系.

Luck 和 Ray 提出了一种把系统变为时不变系统的方法^[17], 即在控制器和执行器的节点增加数据缓冲区, 所有节点工作在同步方式下, 通过使缓冲区长度大于最坏状况下的网络延迟, 使系统变为时不变系统. 但这种方法的缺点是增大了系统的控制延迟, 降低了系统的性能.

3.2.2 时变网络延迟

Liu 和 Ray 提出了一种传感器和控制器采用时间驱动采样, 执行器采用事件驱动采样的机制^[18], 把延迟信号作为被控对象的离散扩展模型的状态, 并设计了随机 LQ 最优控制器, 同时还指出了时间戳对于状态估计的重要性. Ray 又在 LQ 控制器中加入了一个随机状态估计器来最小化状态估计误差的变化^[19].

Chan 和 Ozguner 给出了一种简化的处理方法^[20], 在传感器节点, 待发送的数据报文放入一先入先出队列, 并把此时队列中的报文数目作为时间戳信息附加在报文内. 控制器节点接收到来自传感器信息的数据后, 可根据这一简化的时间戳信息来减少数据延迟时间的不确定性, 再根据已知的延迟概率分布特性, 构造一个状态估计器. 传感器和控制器节点都采用时间驱动的采样方式. 这种方法适用于网络延迟是采样周期整数倍的情况.

Nilsson 则提出一种传感器采用时间驱动采样, 控制器和执行器采用事件驱动采样的机制^[21]. 用随机方法研究了当网络延迟为独立随机分布和服从 Markov 链时的控制系统分析与设计. Beldiman 等还给出了一种 NCS 估计器, 可以估计在两次传输之间的被控对象输出值, 以改进网络化控制系统的性能^[22].

此外,通过把网络延迟作为一个不确定的参数,可以用鲁棒控制方法对时滞系统进行分析和设计^[23-25]。

3.3 基于有限容量信道的反馈

在传统的控制系统设计中,通常假定数据的传输和处理是零传输延迟和无限高精度的。然而在网络化控制系统中,这一假定不再合适。由于系统状态的观测值在量化和编码后通过有限速率网络传送给控制器,量化和编码对控制系统性能的影响不能忽略,系统的稳定性也必须重新加以分析。

3.3.1 量化器设计问题

在数字控制中,量化器对反馈控制系统性能的影响已经得到了较多研究。在网络化控制系统中,通过网络传输的数据必须表示为有限个比特。为了减小量化误差,需要增加比特的个数,从而使得网络负载和延迟增大。而为了降低数据速率就必然增大量化误差,这可能会导致系统的不稳定。因此量化器的优化设计变得更为重要和困难。网络化控制系统量化器设计的关键是在满足规定的控制系统性能的同时使得所需的数据速率最小化。

Delchamps 研究了基于量化状态反馈的线性系统镇定问题^[26]。不同于传统的把量化值看作真实值逼近的研究思路,作者从一个新的角度来理解量化问题,即把 n 维状态变量的量化器表示为映射 $q: R^n$

J , 其中量化器输出 J 为一有限集或可数集。这使得采用优化方法设计粗糙量化器成为可能。在这一思路的启发下, Brockett 和 Liberzon 提出用一类均匀但时变的量化器来稳定系统,量化器可最少只取几个离散值,从而有效地降低了数据速率^[27]。Eliu 和 Mitter 给出一类非均匀量化器的设计^[28]。Ishii 和 Francis 则从混合系统的角度研究了网络化控制系统的状态量化问题^[29]。

3.3.2 编码器设计问题

控制网络可被看作连接被控对象和控制器的一个有限容量的信道,因此可把被控对象的观测值作为信源,从信息论的角度研究编码问题。

假定系统的状态为一随机过程,为了获取系统状态,首先对状态观测值按照一定的编码规则进行编码,然后以有限速率进行传输,在信道的接收端,再构造一个估计器进行状态估计。很显然,编码器和状态估计器的设计将影响控制系统的性能。

传统的信息理论通常假定信源为独立同分布的,基于这种信源的编码和解码也是非递归的。然而在控制系统中,系统状态的观测值往往是高度相关

而非独立同分布,并且系统的状态估计也要求采用递归的编码机制,因而必须从控制系统的角度重新分析编码问题。

Wong 和 Brockett 通过对有限信道容量下的编码与状态估计问题的研究,提出了一种有限递归编码器-估计器序列,使得编码器只依赖于上一次的码值和某些辅助变量^[30]。同时还研究了两类具体的编码器-估计器序列,并讨论了其性能与信道容量、系统动态特性的关系。在此基础上,他们进一步研究了基于有限容量信道的反馈系统镇定问题^[31]。由于传统的稳定性分析方法不再适用,他们引入了一种弱稳定性的概念,并给出了在有限带宽网络下系统满足这种弱稳定性的条件。

Nair 和 Evans 从另外一个角度研究了基于有限容量信道反馈的系统稳定性问题^[32],把被控对象看作一个无限维、时变的 ARMA 模型,即

$$x_{k+1} = \sum_{j=0}^m a_{k,j} x_{k-j} + \sum_{j=0}^m b_{k,j} u_{k-j} \quad (3)$$

被控对象的输出经编码后通过信道以速率 R 发送,编码器由函数 γ 描述,即在 k 时刻的编码值为

$$s_k = \gamma(x_0, s_0, \dots, s_{k-1}), \quad (4)$$

则系统的稳定性问题可转化为设计编码器 γ 和控制器 u ,使得系统输出的 m 阶统计矩渐近趋于 0。

作者首先提出一系统输出的 m 阶统计矩相关的有限时域目标函数,并解决了其最小化问题,然后用渐近量化理论把结果推广到无限时域目标,从而推导出编码器-控制器满足系统输出的 m 阶统计矩渐近趋于 0 的充要条件。在被控对象为有限维和时不变的情况下,这一条件可简化为一不等式。

Tatikonda 等研究了基于有限带宽通信的 LQG 控制问题^[33],建立了编码器/解码器和信道的模型,指出了分离原理的成立,即控制器和编码器/解码器可以独立地设计,进而讨论了数据速率与系统稳定性的关系。

4 网络化控制系统的应用与研究展望

目前,网络化控制系统已在过程自动化、制造自动化、航空航天、无线通信、机器人、交通系统、智能建筑、国防等领域获得了广泛的应用。网络化控制系统具备互操作性、可移植性、可互换性、可裁减性等特点,同时能实现与信息网络的无缝集成,并能实现管理/控制的一体化,因此在过程工业和制造工业中,将会取代传统的 DCS 和 PLC 系统。在汽车、飞机控制系统中,具有硬实时性和高可靠性的网络化控制结构将成为主流。为使网络化控制系统获得更

好的应用, 仍有较多问题有待于解决, 下面列举几点:

1) 网络特性分析与系统建模

在已有的研究中给出的一些系统模型存在着系统参数确定困难的问题。如在用跳变线性系统对网络化控制系统建模时, 假设网络延迟特性服从Markov链, 但Markov链的转移概率矩阵的确定是一个难点, 相关的文献都没有给出较可行的方法。随着控制系统范围的扩大和对网络带宽需求的增长, 传统意义上的数据通信网络也将用于控制, 网络的拓扑结构将变得复杂化。如何在一个基于数据包交换的异步网络中实现闭环控制, 是个复杂的理论问题。

2) 控制和网络的集成优化调度问题

在传统的计算机控制系统设计中, 通常假设应用系统能提供确定的、等间距的采样。但在网络化控制系统中, 这一假设不再成立, 控制任务和网络报文的调度, 都对控制系统性能产生影响, 因此有必要研究控制和网络的集成优化调度问题。在实际的网络化控制系统中, 网络上既有周期性的传感与控制信息, 也有非周期性的报警等信息, 同时系统应具备一定的柔性, 即运行时能动态改变报文调度列表。而目前有关网络调度的研究通常假设所有传输报文是周期性的和运行前确定的, 相应的理论结果与应用还存在较大距离, 需要在今后的研究中加以解决。

3) 网络化控制系统的综合问题

为了把网络化控制系统的理论研究成果应用于工程实践, 需要设计方法学的指导和相应的工具支持。控制系统最终要通过硬件和软件来实现, 其中软件所占的比重越来越大。从软件工程的角度, 网络化控制系统可看作一种分布式环境下的实时嵌入式软件。传统的软件工程方法不能有效地解决这类软件的建模、仿真、设计、验证、测试等问题。作为传统控制理论和形式化理论的交叉, 正在兴起的混合系统理论得到了较多研究者的注意, 在这方面比较有影响的工作是加州大学Berkeley分校的CHES项目。

5 结 语

网络化控制系统的发展是控制系统日趋复杂化的体现, 其理论基础跨越多个学科, 应用范围遍及多个领域。作为一个新兴的研究领域, 网络化控制系统很多问题的研究仅是一个开始, 还存在着大量课题有待进一步的深化研究。

参考文献(References):

- [1] Mitter S K. Control with limited information: The role of systems theory and information theory [J]. *ISIT 2000 Plenary Talk, IEEE Information Theory Society Newsletter*, 2000, 50: 1-23
- [2] Murray R M, Astrom K J, Boyd S P, et al. Future directions in control in an information-rich world [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2003, 23(2): 20-33
- [3] Felser M, Sauter T. The fieldbus war: History or short break between battles [A]? *Proc of 4th IEEE International Workshop on in Factory Communication Systems* [C]. Vastaras, 2002 73-80
- [4] Raji R S. Smart networks for control [J]. *IEEE on Spectrum*, 1994, 31(6): 49-55
- [5] Brockett R W. Stabilization of motor networks [A]. *Proc of the 34th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. New Orleans, 1995 1484-1488
- [6] Hristu D. Stabilization of LTI systems with communication constraints [A]. *Proc of the 2000 American Control Conf* [C]. Chicago, 2000 2342-2346
- [7] Rehbinder H, Sanfridson M. Scheduling of a limited communication channel for optimal control [A]. *Proc of the 39th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Sydney, 2000 2342-2346
- [8] Lincoln B, Bernhardsson B. Efficient pruning of search trees in LQR control of switched linear systems [A]. *Proc of the 39th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Sydney, 2000 1828-1833
- [9] Liu C L, Layland J W. Scheduling algorithm for multiprogramming in a hard-real-time environment [J]. *J of the Association for Computing Machinery*, 1973, 20(1): 46-61
- [10] Audsley N C, Burns A, Wellings A J. Deadline monotonic scheduling theory and application [J]. *IFAC J Control Engineering Practice*, 1993, 1(1): 71-78
- [11] Walsh G C, Ye H. Scheduling of networked control systems [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 57-65
- [12] Lian F L, Moyne J R, Tilbury D M. Performance evaluation of control networks: Ethernet, ControlNet and DeviceNet [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, 21(1): 66-83
- [13] Ray A. Performance evaluation of medium access control protocols for distributed digital avionics [J]. *ASME J of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1987, 109(12): 370-377
- [14] Halevi Y, Ray A. Performance analysis of integrated

- communication and control system networks [J]. *ASME J of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1990, 112(3): 365-371.
- [15] Astrom K J, Wittenmark B. *Computer-Controlled Systems: Theory and Design* [M]. Prentice Hall, 1997.
- [16] Branicky M S, Phillips S R, Zhang W. Stability of networked control system: Explicit analysis of delay [A]. *Proc of the 2000 American Control Conf* [C]. Chicago, 2000 2352-2357.
- [17] Luck R, Ray A. An observer-based compensator for distributed delays[J]. *Automatica*, 1990, 26(5): 903-908.
- [18] Liu L W, Ray A. A stochastic regulator for integrated communication and control system: Part I — Formulation of control law [J]. *ASME J of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 1991, 113(4): 604-611.
- [19] Ray A. Output feedback control under randomly varying distributed delays[J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 1994, 17(4): 701-711.
- [20] Chan H, Ozguner U. Closed-loop control of systems over a communication network with queues[A]. *Proc of American Control Conf* [C]. Baltimore, 1994 811-815.
- [21] Nilsson J. Real-time control systems with delays[D]. Lund: Lund Institute of Technology, 1998.
- [22] Beldiman O, Walsh G C, Bushnell L. Predictors for networked control systems [A]. *Proc of the 2000 American Control Conf* [C]. Chicago, 2000 2347-2351.
- [23] Jeung E T, Oh D C, Kim J H, et al Robust controller design for uncertain systems with time delays: LM I approach [J]. *Automatica*, 1996, 32(8): 1229-1331.
- [24] Li X, Souza C E. Delay-dependent robust stability and stabilization of uncertain linear delay system: A linear matrix inequality approach [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(8): 1144-1148.
- [25] Luo J S, Bosch V D, Weiland S, et al Design of performance robustness for uncertain linear systems with state and control delays [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(11): 1593-1596.
- [26] Delchamps D F. Stabilizing a linear system with quantized state feedback [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1990, 35(8): 916-924.
- [27] Brockett R W, Liberzon D. Quantized feedback stabilization of linear systems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2000, 45(7): 1279-1289.
- [28] Elia N, Mitter S K. Stabilization of linear systems with limited information [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(9): 1384-1400.
- [29] Ishii H, Francis B A. Quadratic stabilization of sampled-data systems with quantization [A]. *Proc of the 15th IFAC World Congress* [C]. Barcelona, 2002.
- [30] Wong W S, Brockett R W. Systems with finite communication bandwidth constraints: Part I - State estimation problems [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(9): 1294-1299.
- [31] Wong W S, Brockett R W. Systems with finite communication bandwidth constraints: Part II — Stabilization with limited information feedback [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(5): 1049-1053.
- [32] Nair G N, Evans R J. Communication-limited stabilization of linear systems [A]. *Proc of the 39th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Sydney, 2000 1005-1010.
- [33] Tatikonda S, Saha A, Mitter S. Control of LQG systems under communication constraints [A]. *Proc of the 37th IEEE Conf on Decision and Control* [C]. Tampa, 1998 1165-1170.