

网络时延在线估计技术与控制器的 协同设计

邵奇可¹ 俞立¹ 张贵军¹

摘要 通过在数据包中附加路由信息, 利用路由跟踪的策略, 确定数据包到达目标节点所经过的路由器的数量, 以此给出网络诱导时延的在线估计方法, 从而较好地克服了利用时间戳方法测量网络传输时延时所产生的远程节点与本地节点之间的时间同步问题. 通过对引入的数据包路由信息的设置和网络路由瓶颈的分析, 给出数据包传输周期的下确界和一种简单的数据丢包的判别方法. 最后给出控制器的协同设计步骤, 实验研究验证了本文方法的有效性.

关键词 网络控制系统, 路由跟踪, 随机时延, 控制器协同设计, 模型预测控制

中图分类号 TP273

Online Delay Evaluation and Controller Co-design for Networked Control Systems

SHAO Qi-Ke¹ YU Li¹ ZHANG Gui-Jun¹

Abstract An online evaluation technology for network induced time delay by redesigning the application protocol without any additional apparatus is proposed in this paper. Firstly, a computational method for network-induced time delay online evaluation and a lower bound on the transmission period are achieved by using automatic route trace technology (ARTT). Secondly, a simple decision-making for the data packet dropout is also discussed. Finally, the controller co-design is described. The effectiveness of the proposed schemes is validated by experiments.

Key words Networked control systems, automatic route trace technology, random delays, controller co-design, model predictive control

1 引言

网络控制系统 (Networked control system, NCS) 是一种将传感器、执行器和控制器等单元通过通信网络闭环的实时控制系统. 由于网络带宽有限, 信息的传送不可避免地产生时延, 这样的时延称为网络诱导时延. 时延的存在会使得系统性能变差, 严重的甚至会影响到系统的稳定性. 同时由于网络诱导时延的随机性和不确定性, 使得网络控制系统的分析和设计变得非常困难, 而网络诱导时延的检测恰恰又是网络控制系统分析与设计的基础^[1].

目前, 针对网络诱导时延的检测技术普遍采用时间戳 (Time-stamped protocol) 方法, 通过在数据包中加入时间信息来计算信息的传输延时^[2, 3]. 然而, 这种方法要求网络控

收稿日期 2006-1-10 收修改稿日期 2006-10-19

Received January 10, 2006; in revised form October 19, 2006

国家杰出青年科学基金 (60525304), 浙江省新世纪高等教育教学改革研究项目 (yb04013), 浙江工业大学科技发展基金项目资助

Supported by the National Science Fund for Distinguished Youth Scholars of P. R. China (60525304), the New Century High Education Teaching Reform Research Project of Zhejiang Province (yb04013), the Science and Technology Foundation of Zhejiang University of Technology

1. 浙江工业大学信息与控制研究所 杭州 310012

1. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310012

DOI: 10.1360/aas-007-0781

制系统的各个节点时钟严格同步, 否则就会带来较大的测量误差. 虽然可以通过引入网络时钟同步器来保证各个节点的时钟同步, 但不可避免地增加了控制系统的硬件投入. 因此, 如何利用通信网络的特性, 在线估计网络诱导时延已成为网络控制系统研究的一个重要方向^[1]. 文献 [4] 在 CANBUS 环境下通过设置信息传输的优先级, 利用得到的第 k 个采样值的延后来在线估计第 $k+1$ 个采样值的延时, 并设计出相应的控制器, 取得了较好的控制效果. 类似的研究还有文献 [5]. 但是, 这类方法对于一类无传输优先级的网络如以太网, 第 k 个采样值时延的确定就会带来较大的误差. 因此对于这类网络, 文献 [4, 5] 中的方法就很难直接应用. 另一方面从系统实施的角度看, 由于 CANBUS 的技术复杂、成本高等弊端也进一步限制了其应用范围^[6].

本文针对目前应用最广泛的以太网^[7], 提出一种基于以太网的时延在线估计技术 (Automatic route trace technology, ARTT) 及控制器的协同设计方法. 相比于时间戳的方法, 本文提出的方法具有如下几个优点: 1) 较好地克服了利用时间戳方法测量网络诱导时延所带来的远程节点与本地节点之间的时钟同步问题; 2) 由于对信息的传输进行了路由的跟踪, 可以方便地判断数据包的丢失.

2 ARTT 时延在线估计技术

ARTT 技术通过在数据包中增加 ICMP 包头, 类似于时间戳方法, 每个数据包包括: 采样值, 控制器的输出值, 检验码等信息, 本地节点与远程控制器的数据包结构如图 1 所示. 已有研究表明传输过程中数据包的网络诱导时延主要表现在传输过程中数据包在路由器 (交换机) 的缓冲队列上的等待时延^[8]. 因此可以用式 (1) 和 (2) 分别估计数据包在路由器上的最大、最小等待时延.

$$\tau_{max} = \sum_{i=1}^n \tau_{max}^i = \sum_{i=1}^n \left(\delta_i + \frac{8p(\beta_i + 1)}{\eta_i} \right) \quad (1)$$

$$\tau_{min} = \sum_{i=1}^n \tau_{min}^i = \sum_{i=1}^n \left(\delta_i + \frac{8p}{\eta_i} \right) \quad (2)$$

其中的 τ_{max}^i 和 τ_{min}^i 是数据包通过第 i 个路由器的最大、最小时延. n 表示数据包在传输过程中经历的路由器个数. p 表示数据包的大小, 单位为 byte/s, δ_i 表示第 i 个路由器处理时间; β_i 表示第 i 个路由器缓冲区的所缓存的数据包的个数; η_i 表示第 i 个路由器的传输带宽, 单位为 bit/s. 因此, 如果数据包在传输过程中经历的路由器的带宽和所配置的缓冲区的大小都相同并且数据包传输过程中无丢包现象, 则数据包从源节点到目标节点的网络诱导时延的估计可以转换为计算数据包在传输过程中所经历的路由器的数量, 然后通过式 (2) 和 (3) 在线估计时延的大小. 另一方面, 由 TCP/IP 协议可知, 数据包每通过一个路由器, TTL 的值就会减 1. 因此, 利用 ARTT 数据包结构, 通过对 ICMP 报头 TTL (Time to live) 字段设置合适的值, 可以利用以下式 (3) 和 (4) 在线估计数据包传输的网络诱导时延.

$$\tau_{max} = \sum_{i=1}^J \tau_{max}^i = \sum_{i=1}^J \left(\delta_i + \frac{8p(\beta_i + 1)}{\eta_i} \right) \quad (3)$$

$$\tau_{min} = \sum_{i=1}^J \tau_{min}^i = \sum_{i=1}^J \left(\delta_i + \frac{8p}{\eta_i} \right) \quad (4)$$

其中 $J = (N_{TTL}^s - N_{TTL}^c)$, N_{TTL}^s 表示源节点的 TTL 的值, N_{TTL}^c 表示目标节点的 TTL 的值.

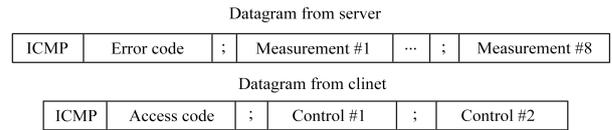


图 1 ARTT 数据包结构

Fig. 1 Structure of data packet from client and server in ARTT protocol

3 ARTT 数据传输丢包判据

由于 TCP/IP 协议是可靠的面向连接的传输协议, 因此当数据包的 TTL 的值等于零时, 路由器会自动的丢弃该数据包, 并且利用重传机制, 要求源节点重新传输. 从控制器的角度看, 数据包在传输过程中就发生了丢包现象. 因此, 利用 ARTT 技术通过预先设置合适的 TTL 值就可以方便地判别数据包的丢失现象.

定理 1. 如果目标节点所接收到的数据包的全 TTL 值满足以下条件, 则数据包在传输过程中没有发生丢包现象.

$$\Delta N_{TTL} \in \left[\tau_{min} / \left(\delta_i + \frac{8p(\beta_i + 1)}{\eta_i} \right), \tau_{max} / \left(\delta_i + \frac{8p}{\eta_i} \right) \right] \quad (5)$$

证明. 假设 τ 是源节点到目标节点的网络诱导时延, Ξ 是数据包在整个传输过程中所经历过的路由器处理的平均时间. 则

$$\Delta N_{TTL} = \tau / \Xi, \tau_{min} \leq \tau \leq \tau_{max} \quad (6)$$

$$\delta_i + (8p/\eta_i) \leq \Xi \leq \delta_i + 8p(\beta_i + 1)/\eta_i \quad (7)$$

所以

$$\tau_{min} / \left(\delta_i + \frac{8p(\beta_i + 1)}{\eta_i} \right) \leq \tau_{min} / \Xi \leq \Delta N_{TTL} \quad (8)$$

$$\Delta N_{TTL} \leq \tau_{max} / \Xi \leq \tau_{max} / \left(\delta_i + \frac{8p}{\eta_i} \right) \quad (9)$$

由式 (8) 和 (9) 易知式 (5) 成立. \square

4 控制器协同设计

通过以上分析可知, 如果接收到的数据包的全 TTL 值满足条件 (5), 并且系统在传输过程中仅仅传输周期性的实时数据 (采样值、控制器的输出), 则可以利用式 (3) 和 (4) 来估计系统的网络诱导时延 τ , 并且满足: $\tau \in [\tau_{min}, \tau_{max}]$. 然而在网络控制系统中, 所传输的数据类型不仅仅是周期性的实时数据还包括其他非周期性的数据, 如命令信息, 报警信息等^[1]. 因此在 ARTT 技术上, 对于系统的传输周期必须有一定的限制.

4.1 传输周期的下确界

定理 2. 如果系统传输周期的下确界 T_{0min} 满足以下条件

$$T_{0min} = \max \left(\frac{8(S + E(N)S_r)}{\eta_i}, h \right) \quad (10)$$

则利用 ARTT, 控制系统的网络诱导时延 $\tau \in [\tau_{min}, \tau_{max}]$. 其中 S 是周期性数据的数据包大小. S_r 是在一个采样周期内非周期性数据期望通过路由器 i 的数据包大小. $E(N)$ 是

在一个采样周期内非周期性数据期望通过路由器 i 的数据包的个数。 h 是非网络环境下的控制系统的采样周期。

证明. 假设 r_i 是周期性数据在未发生数据丢包的情况下在第 i 个路由器的通过率。则 r_i 满足

$$r_i = \min\left(\frac{\eta_i}{8E_{Ti}}, 1\right) \quad (11)$$

其中 E_{Ti} 表示单位时间内达到路由器带宽瓶颈的数据包大小。因此 $E_{Ti} = S/T + f(t)/T$, 其中 T 表示系统的传输周期, $f(t)$ 指 T 时间内, 非周期性数据到达路由器 i 的数据包大小。假设非周期性数据到达路由器 i 的时间 t_i 满足 Poisson 分布。因此, 为了使数据包在传输过程中不发生丢包现象, 则 E_{Ti} 必须小于路由器的带宽。即满足

$$T_{0min} = \frac{h}{r_i} = \max\left(\frac{8h(S/h + f(t)/h)}{\eta_i}, h\right) \quad (12)$$

又因为非周期性数据到达路由器 i 的时间 t_i 满足 Poisson 分布, 所以 $\sum_{i=1}^N t_i \approx T_{0min}$ 并且 $f(t) = E(N)S_r$ 因此

$$\begin{aligned} E(N) &= \sum_{m=1}^{\infty} P(N = m) \times m \\ &= 1 \times P(N = 1) + \dots + m \times P(N = m) + \dots \\ &= \frac{\lambda^h}{h!} e^{-\lambda} + \dots + m \times \frac{(m\lambda)^h}{h!} e^{-m\lambda} + \dots \\ &= \sum_{m=1}^{+\infty} m \times \frac{(m\lambda)^h}{h!} e^{-m\lambda} \end{aligned} \quad (13)$$

考虑到在实际应用中 m 值是有限的, 因此

$$E(N) = \sum_{m=1}^n m \times \frac{(m\lambda)^h}{h!} e^{-m\lambda} \quad (14)$$

故式 (10) 成立。 \square

4.2 控制器的协同设计

通过以上分析, 易知网络环境下, 如果系统的传输周期满足定理 2 的条件, 则网络诱导时延 $\tau \in [\tau_{min}, \tau_{max}]$, 因此可以利用 $\tau = (\tau_{min} + \tau_{max})/2$ 来近似估计系统的网络诱导时延, 并且随着系统传输周期的增加, τ 的估计误差会进一步的减小。然而已有研究表明, 对于增大系统的传输周期, 会导致系统的控制性能变差, 甚至不稳定^[2,9~11]。因此, 网络环境下控制器的设计有必要根据系统的性能, 网络的特性进行协同设计, 下面给出控制器的协同设计的步骤:

- 步骤 1.** 根据式 (10) 选择合适的 T 和 h ;
- 步骤 2.** 利用 ARTT 技术, 利用式 (3) 和 (4) 在线估计网络诱导时延的最大、最小界;
- 步骤 3.** 利用 ARTT 技术和定理 1, 离线分析时延的分布特性和数据丢包特性, 进而选择合适的时延计算方法;
- 步骤 4.** 选择合适的控制器补偿策略。

根据文 [1, 12], 如果系统的网络诱导时延小于系统的采样周期, 式 (15) 的连续时不变系统可以转换成式 (16) 的离散时间系统。

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y &= Cx(t) \end{aligned} \quad (15)$$

其中,

$$\begin{aligned} x(0) &= x_0 \neq 0 \\ x_{k+1} &= \Phi x_k + \Gamma_0(\tau_k)u_k + \Gamma_1(\tau_k)u_{k-1} \\ y_k &= Cx_k \end{aligned} \quad (16)$$

其中 $\Phi = e^{Ah}$, $\Gamma_0(\tau_k) = \int_0^{h-\tau_k} e^{As} B ds$, $\Gamma_1(\tau_k) = \int_{h-\tau_k}^h e^{As} B ds$. $\tau_k \in [\tau_{min}, \tau_{max}]$ 由式 (3) 和 (4) 计算。根据控制器的协同设计步骤, 首先选择合适的 T 和 h , 取 $\bar{\tau}_k = \bar{\tau}_k^{sc} + \bar{\tau}_k^{ca}$, 然后通过离线实验, 发现 $\bar{\tau}_k^{ca} \approx 0.4\bar{\tau}_k^{sc}$, 因此可以根据实际应用忽略, 所以, $\tau_k = \bar{\tau}_k^{sc} = (\tau_{min} + \tau_{max})/2$ 。根据文献 [3] 利用 MPC, 定义系统的性能指标函数如下

$$\min_{\{u_k, \dots, u_{k+n}\}} \left\{ \sum_{i=1}^{i=p} \|y_{k+i}^p - y_{k+i}^r\|^2 \right\} \quad (17)$$

其中 y_{k+i}^r 为系统期望的参考轨迹。为谈论方便, 假设系统的参考轨迹为系统的设定值 y^{set} , 即 $y_{k+1}^r = y_{k+2}^r = \dots = y_{k+p}^r = y^{set}$. y_{k+i}^p 为系统预测输出轨迹。可以利用式 (18) 来计算系统的最优轨迹。

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \Xi_0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Xi_1 & \Xi_2 & \dots & \Xi_3 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Xi_4 & \Xi_5 & \dots & \Xi_6 \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中 $\Xi_0 = a_1 - C\bar{\Gamma}_1$
 $\Xi_1 = a_{n+1} - C\bar{\Gamma}_1 \Phi^{n-1} (1 - \Phi)$
 $\Xi_2 = a_n - C\bar{\Gamma}_1 \Phi^{n-2} (1 - \Phi)$
 $\Xi_3 = a_1 - \bar{\Gamma}_1$
 $\Xi_4 = a_p - C\bar{\Gamma}_1 \Phi^{p-2} (1 - \Phi)$
 $\Xi_5 = a_{p-1} - C\bar{\Gamma}_1 \Phi^{p-3} (1 - \Phi)$
 $\Xi_6 = a_{p-n} - C\bar{\Gamma}_1 \Phi^{p-n-2} (1 - \Phi)$
 $\Phi = e^{A\bar{h}}$, $\bar{\Gamma}_1 = \Gamma_1(\tau_k)$. $\hat{A} = A - \Delta A$. ΔA 是修正矩阵, 可以利用下面规则通过系统的单位阶跃响应系数 $a_1, \dots, a_i, \dots, a_p$ 得到。

$$\begin{aligned} a_1 &\longrightarrow a_1 - C\bar{\Gamma}_1 \\ a_i &\longrightarrow a_i - C\bar{\Gamma}_1 \Phi^{p-n-2} (1 - \Phi), \quad i \geq 2 \end{aligned} \quad (19)$$

需要说明的是 \hat{A} 没有必要在每个采样时刻都进行更新, 除非时延分布特性具有较好的模型, 在这种情况下, 可以通过预测时延来改变 \hat{A} 矩阵。

5 实验

通过校园网利用自行开发的基于校园网的远程控制软件对实验室三阶水槽控制系统分别进行远程控制实验。系统软件运行环境为: Windows 2000/Windows XP, SQL Server 7.0. 实验结果如图 2 所示。图 3 给出利用 ARTT 技术和 Time-Stamped 技术得到的网络诱导平均时延。表 1 为实验条件。

对象的模型如下

$$G(s) = \frac{1.1524s + 0.5767}{s^2 - 0.4657s - 0.4834} \quad (20)$$

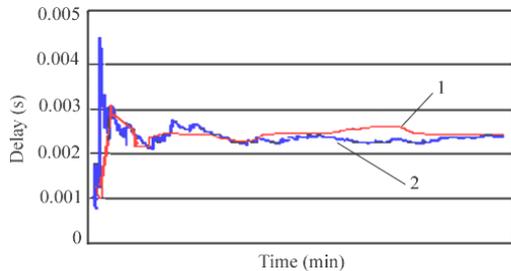
表 1 实验条件
Table 1 Experimental conditions

η_i	β_i	σ_i	$p(s)$	m	λ	S_r	h	T_{0min}
10 mbits	50	0.1 ms	50 bytes	1	0.1	10 bytes	50 ms	50 ms



图 2 实验结果

Fig. 2 The experimental result based on delay on-line evaluation using ARTT



1. Online Evaluation by ARTT; 2. Measured by Time Stamp technology

图 3 网络诱导时延

Fig. 3 Average of Ethernet delay online evaluation by different technology

6 结论

本文通过在数据包中附加路由信息, 利用路由跟踪的策略, 确定数据包到达目标节点所经过的路由器的数量, 以此给出网络诱导时延的在线估计方法, 从而较好的克服了利用时间戳方法测量网络传输时延所带来的远程节点与本地节点之间的时钟同步问题. 进而, 通过对引入的数据包路由信息的设置和网络路由瓶颈的分析, 给出网络传输周期的下确界和一种简单的数据丢包的判别方法. 最后给出相应的时延补偿控制策略. 通过实验进一步表明本文方法的可行性.

References

- 1 Nilsson J, Bernhardsson B, Wittenmark B. Stochastic analysis and control of real-time systems with random time delays. *Automatica*, 1998, **34**(1): 57~64
- 2 Zhang W. Stability analysis of networked control systems [Ph.D. dissertation], Case Western Reserve University, 2001
- 3 Srinivasagupta D, Schattler H, Joseph B. Time-stamped model predictive control: an algorithm for control of processes with random delays. *International Journal of Computers and Chemical Engineering*, 2004, **24**(8): 1337~1346

- 4 Zhen W, Xie J Y. On-line delay-evaluation control for networked control systems. In: Proceedings of 41st IEEE Conference on Decision and Control. IEEE, 2002. 1649~1650
- 5 Zhang L, Fang H F. A novel controller design and evaluation for networked control systems with time-variant delays. *Journal of the Franklin Institute*, 2006, **343**(2): 161~167
- 6 Lian F L, Moyne J R, Tilbury D M. Performance evaluation of control networks for manufacturing systems. In: Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division. IEEE, 1999. 14~19
- 7 Kaplan G. Ethernet's winning ways. *IEEE Spectrum*, 2001, **38**(1): 113~115
- 8 Hartman J R, Branicky M S, Liberatore V. Time-dependent dynamics in networked sensing and control. In: Proceedings of the American Control Conference. Portland, USA: IEEE, 2005. 2925~2932
- 9 Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 2001, **21**(1): 84~99
- 10 Lian F L, John Yookb, Paul Otanezc, Dawn Tilbury. Design of sampling and transmission rates for achieving control and communication performance in networked agent systems. In: Proceedings of the American Control Conference, Denver, USA: IEEE, 2003. 3329~3334
- 11 Lian F L, Moyne J R, Tilbury D M. Network design consideration for distributed control systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, **10**(2): 297~307
- 12 M. M. Aakil Aa P, Norlander T. Parametric linear quadratic control and random delays. *IEE Proceedings of the Control Theory Applications*, 2000, **117**(6): 641~647

邵奇可 博士研究生, 浙江工业大学信息学院讲师. 主要研究方向为网络控制, 计算机网络. 本文通信作者. E-mail: sqk@zjut.edu.cn (SHAO Qi-Ke Ph.D. candidate. He is currently a lecturer at College of Information Engineering, Zhejiang University. His research interest covers networked control systems and computer network. Corresponding author of this paper.)

俞立 浙江工业大学信息学院教授. 主要研究方向为网络控制、鲁棒控制和时滞系统. E-mail: lyu@zjut.edu.cn (YU Li Professor at College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology. His research interest covers robust control, time-delay systems, and networked control systems.)

张贵军 浙江工业大学信息学院讲师, 主要研究方向为进化计算、网络控制和地理信息系统. E-mail: zgj@zjut.edu.cn (ZHANG Gui-Jun Lecturer at College of Information, Zhejiang University of Technology. His research interest covers evolutional computation, network control, and GIS.)