

文章编号: 1001-0920(2012)03-0451-04

基于滑模变结构的无线传感器网络跨层拥塞控制

李明维^{1,2}, 井元伟², 陈向勇²

(1. 东北大学秦皇岛分校 信息与计算科学系, 河北 秦皇岛 066004; 2. 东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110819)

摘要: 基于滑模变结构机制, 讨论了节点级和链路级同时发生拥塞情况下的无线传感器网络跨层拥塞控制问题. 对于节点级拥塞和链路级拥塞分别提出了准滑模控制策略. 链路级拥塞采取节点输出流量最小的数据包优先进行传输的原则, 实现了拥塞控制的跨层设计, 大大降低了各节点排队时间, 能够有效缓解拥塞的发生. 仿真结果表明, 该算法实现了较高的吞吐量和较低的延迟, 提高了整个网络的服务质量.

关键词: 无线传感器网络; 滑模; 跨层; 拥塞控制

中图分类号: TP393

文献标识码: A

Cross-layer congestion control for wireless sensor network based on sliding mode variable structure

LI Ming-wei^{1,2}, JING Yuan-wei², CHEN Xiang-yong²

(1. Department of Information and Computing Science, Northeastern University at Qinhuangdao, Qinhuangdao 066004, China; 2. College of Information Science and Technology, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Correspondent: LI Ming-wei, E-mail: lmw921026@126.com)

Abstract: Cross-layer congestion control for wireless sensor network based on sliding mode variable structure is considered, for which node-congestion and link-congestion are occurred simultaneously. A discrete quasi-sliding mode control based on node-congestion and link-congestion is presented. Min-data package of node outgoing traffic is prioritized transmission in link-congestion. Cross-layer design of congestion control is significantly achieved. The algorithm can reduce queue time and alleviate congestion. Simulation results show that the algorithm can restrain the congestion in wireless sensor network, maintain high throughput and low delay time, and improve the quality of service for the whole network.

Key words: wireless sensor network; sliding mode; cross-layer; congestion control

1 引言

无线传感器网络(WSN)的拥塞问题是近年来网络研究的热点之一. 拥塞控制技术是传输控制协议中最基本、最核心的部分. 无线传感器网络拥塞可以分为两种类型^[1]: 1) 节点级的拥塞. 即节点需要发送的分组流量超过节点的发送能力, 导致缓存溢出造成数据分组的丢失和网络排队延迟的增加. 2) 无线链路级的拥塞. 无线信道是共享信道, 在同一时刻相邻节点只能有一个节点使用无线信道, 当多个相邻节点同时竞争使用无线信道时便会产生访问冲突引起链路级拥塞, 增加分组的服务时间, 降低链路利用率和网络的吞吐量. 因此, 有效的拥塞控制是无线传感器网络研究中亟待解决的问题.

近年来, 研究人员针对传感器网络应用及通信方式的特殊性提出了一些相关的解决节点拥塞的办法. 文献[2-4]提出的机制都是基于缓冲区或信道使用情况以及通过对节点发送速率或数据流量的调节来对节点拥塞进行控制. 但是这种基于速率的拥塞控制算法不能准确地分配速率, 因为在无线并发通信的条件下, 对速率的计算不仅要依赖于底层的媒体访问控制协议(MAC)算法, 而且依赖于数据流量的分布. [5]利用队列和信道估计预测网络拥塞, 自适应流量控制算法选择由自适应往返时间间隔机制产生的速率, 实现基于Lyapunov方法的闭环系统的稳定性. [6]提出了基于拥塞控制的无线传感器网络数据汇集树生成算法, 该算法通过层次发现、邻居发现、启发式搜索和

收稿日期: 2011-04-06; 修回日期: 2011-08-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60774097); 中央高校基本科研专项业务费项目(N100604019).

作者简介: 李明维(1982-), 女, 博士生, 从事无线传感器网络拥塞控制的研究; 井元伟(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 从事网络拥塞控制等研究.

流量均衡策略构造一棵最短路径最小拥塞权值树。

本文在无线传感器网络中节点级拥塞和链路级拥塞同时发生的情况下,引入滑模控制机制,提出了基于离散时变趋近律的准滑模控制策略.由于节点级拥塞的特点和有线拥塞相同,本文采取相同的拥塞控制,链路级拥塞采取节点输出流量最小的数据包优先进行传输的原则.将基于传输层的节点级拥塞控制和基于链路层的链路级拥塞控制相结合,所设计的控制器大大降低了各节点排队时间,有效缓解拥塞的发生.

2 模型描述

在离散系统里,由输入输出业务流 $q_i(k)$ 引起的链路容量的变化可以描述为

$$q_i(k+1) = \text{Sat}_{q_0}(q_i(k) + Tu_i(k) - x_i(k)). \quad (1)$$

其中: $u_i(k)$ 为输入业务流, $x_i(k)$ 为输出业务流, T 为传输时延, Sat_{q_0} 为饱和函数.

为了获得理想的描述模型,本文融合离散流模型(1)和文献[7]中无线传感器网络主动拥塞控制算法使用的扰动微分方程,得到一种新的基于拥塞控制的无线传感器网络流模型.文献[7]的动态模型表示为

$$dx_i = (u_i - x_i)x_i \frac{\sum x_i - \frac{q_0 - q(t)}{T} - C}{\sum x_i} dt. \quad (2)$$

其中: $x_i(k)$, $u_i(k)$, $q_i(k)$, T 与式(1)描述相同; C 为链路容量.将方程(2)在平衡点 (u_0, x_0, q_d) 处线性化,得到如下线性微分方程:

$$\dot{z}(t) = Mz(t) + Nu(t). \quad (3)$$

其中

$$M = \left(\sum x_i \right)^{-2} (u_i - 2x_i) \left(\sum x_i - \frac{q_0 - q_d}{T} - C \right) + (u_i - x_i)x_i \left(4 - \frac{q_0 - q_d}{T} - C \right),$$

$$N = x_0 \frac{\sum x_0 - \frac{q_0 - q_d}{T} - C}{\sum x_i}, \quad q_0 = \frac{C}{N_0},$$

N_0 为激活分组数.将系统(3)转化为离散形式有

$$x_i(k+1) = (M+1)x_i(k) + (N+1)u_i(k). \quad (4)$$

令 $x(k+1) = (q(k+1), x_i(k+1))^T$,联立式(1)和(4)得到

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k). \quad (5)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 0 & M+1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} T \\ N \end{bmatrix}. \quad (6)$$

3 WSN跨层拥塞控制器设计

考虑到无线传感器网络系统的复杂性、时变性及不确定性,将滑模控制引入到无线传感器网络的拥塞控制中.由于滑动模态可以进行设计且与对象参

数及扰动无关,变结构控制具有快速响应、对参数变化及扰动不灵敏、物理实现简单等优点^[8-9],适合于无线传感器网络系统的应用研究.本文应用滑模变结构的方法来解决WSN拥塞问题,实现了传输层和数据链路层同时进行拥塞控制的目的,且该算法具有耗能低、鲁棒性强等优点.

为了降低系统延时,引入如下假设:

假设 1 令输出流误差 $e(k) = x(k) - x_d$,其中 x_d 为理想输出流,满足

$$\|e(k)\|^2 < \|e(k-1)\|^2/4. \quad (7)$$

注 1 若网络中发生拥塞,则跟踪值与理想输出流量之间的误差会随之增加,拥塞控制所追求的目标是在最短的时间内消除拥塞,即在最短时间内加速误差收敛.

定义滑模面

$$s(k) = \lambda e(k) - e(k-1). \quad (8)$$

其中: $s(k) \in R^{n \times 1}$, λ 为待设计的常数.

定理 1 对于系统(5),如果输出流误差满足假设(7),则采用线性滑模(8)选择适当的常数 λ ,使得在

$$u(k) = u_0 + u_1 \quad (9)$$

的作用下,系统(5)的闭环系统渐近稳定.其中

$$u_0 = -\frac{1}{e^T(k)B} (x^T(k)A^T e(k) + x_d^T(k)e(k) + \lambda \|e(k)\|^2 - e^T(k)s(k) - Px_d),$$

$$u_1 = \left\{ -\frac{x_j(k)}{e^T(k)B} \Big| \min(Px(k)) \right\}, \quad P = (0, 1).$$

同时滑模参数 λ 满足如下条件:

$$\frac{e(k-1) - e(k-2)}{e(k) - e(k-1)} < \lambda < \frac{e(k-1)}{e(k)}.$$

证明 1)取Lyapunov函数 $V(k) = s^T(k)s(k)$,将式(5)代入,有

$$\Delta V(k) = s^T(k+1)s(k+1) - s^T(k)s(k) = (\lambda e^T(k+1) - e^T(k))(\lambda e(k+1) - e(k)) - (\lambda e(k) - e(k-1))(\lambda e(k) - e(k-1)) = \lambda^2 (x^T(k)A^T + u(k)B^T - x_d^T)(Ax(k) + Bu(k) - x_d) - \lambda (x^T(k)A^T + u(k)B^T - x_d^T)(x(k) - x_d) - \lambda (x^T(k) - x_d^T)(Ax(k) + Bu(k) - x_d) + (1 - \lambda^2)\|e(k)\|^2 + \lambda e^T(k)e(k-1) + \lambda e^T(k-1)e(k) - \|e(k-1)\|^2.$$

由于 $\|e(k+1)\|^2 \leq \|e(k)\|^2$,有

$$\Delta V(k) \leq 2\lambda x^T(k)A^T e(k) + 2\lambda e^T(k)B^T u(k) + 2\lambda x_d^T e(k) + \|e(k)\|^2 + 2\lambda e^T(k)e(k-1) - \|e(k-1)\|. \quad (10)$$

将 $u(k)$ 代入式(10), 由于

$$\min\{Px(k)\} - Px_d = \min\{Pe(k)\} \rightarrow 0,$$

根据 Lyapunov 稳定性理论可知, 在控制律(9)的作用下 $s(k)$ 总能在有限时间内到达 $s(k) = 0$.

2) 参数 λ 范围的选取. 因为 $s(k)^T \Delta s(k) < 0$, 有

$$\begin{aligned} s(k)^T \Delta s(k) = & \lambda e(k) - (1 + \lambda)e(k - 1) + e(k - 2) = \\ & \lambda^2(\|e(k)\|^2 - e^T(k)e(k - 1)) + \lambda(e^T(k)e(k - 2) - \\ & 2e^T(k - 1)e(k) + \|e(k - 1)\|^2) + \\ & \|e(k - 1)\|^2 - e^T(k - 1)e(k - 2). \end{aligned}$$

由于受输入流量控制, 输出流量是可控的, 且 $e(k)$ 应是单调趋近于0的. 由二次函数性质可得到 $e(k)$ 的取值范围. □

定理 2 对于系统(5), 如果输出流误差满足假设(7), 则采用线性滑模(8)选择适当的常数 λ , 使得在

$$u(k) = u_0 + u_1 \quad (11)$$

的作用下, 系统(5)的闭环系统渐近稳定, 其中

$$u_0 = -\frac{1}{\|B\|^2}(B^T \lambda e(k) - B^T s(k) + B^T x_d - B^T Ax(k)),$$

$$u_1 = \left\{ -\frac{B^T \lambda x_j(k) \text{sgne}_2(k)}{\|B\|^2} \Big| \min(x_i(k)) \right\}.$$

同时滑模参数 λ 满足 $\lambda < 0$, 或者

$$\lambda > \frac{\|e(k - 1)\|^2 - 2e^T(k)e(k - 1) + e(k)e(k - 2)}{e^T(k)e(k - 1) - \|e(k)\|^2}.$$

证明 取 Lyapunov 函数 $V(k) = s^T(k)s(k)$, 将式(5)代入有

$$\begin{aligned} \Delta V(k) = s^T(k + 1)s(k + 1) - s^T(k)s(k) = & (\lambda e^T(k + 1) - e^T(k))(\lambda e(k + 1) - e(k)) - \\ & (\lambda e(k) - e(k - 1))(\lambda e(k) - e(k - 1)) = \\ & \lambda^2(\|e(k + 1)\|^2 - \|e(k)\|^2) + \lambda(-2e^T(k + 1)e(k) + \\ & 2e^T(k)e(k - 1)) + \|e(k)\|^2 - \|e(k - 1)\|^2. \end{aligned} \quad (12)$$

将 $e(k - 1) = \lambda e(k) - s(k)$ 代入式(12), 由假设1, 得到

$$\begin{aligned} \Delta V(k) \leq & -\lambda^2\|e(k)\|^2 - 2\lambda e^T(k)s(k) - 2\lambda e^T(k + 1)e(k) = \\ & -\lambda^2\|e(k)\|^2 - 2\lambda e^T(k)s(k) - 2\lambda e^T(Ax(k) + \\ & Bu(k) - x_d). \end{aligned} \quad (13)$$

将 $u(k)$ 代入式(13)得到

$$-3\lambda^2\|e(k)\|^2 - 2\lambda^2 e_2(k)x_j(k)\text{sgne}_2(k) < 0.$$

参数 λ 选取范围的证明见定理1. □

注 2 当节点级发生拥塞时, 通过 u_0 的设计, 可以使系统从任意初始状态快速地到达滑模面上, 加快系统的趋近速度, 且能够改善系统的稳态抖振.

注 3 当链路级发生拥塞时, 通过 u_1 使得队列

长度较短的数据包得到优先传输, 这样避免了由于输出流量较大的数据包优先长时间占用无线信道, 从而减少排队等待的数据包数.

4 仿真分析

通过实例仿真来验证本文设计的 WSN 跨层拥塞控制器的有效性, 网络拓扑结构如图1所示.

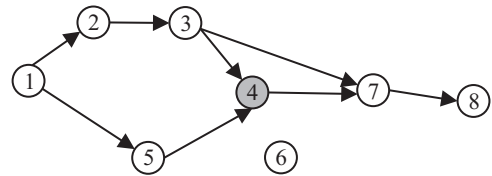


图1 WSN 拓扑结构

为了说明问题, 在瓶颈节点4中分别对文献[10-11]和本文算法进行仿真, 尝试3种不同的拥塞控制算法, 参数选择如下: $N_0 = 144$, $C = 20160$ 分组/s, $q_0 = 140$ 分组, $q_d = 120$ 分组, $u_0 = 25$, $x_1 = 42$, $x_2 = 40$, $x_d = (38, 40)$, $T = 1$ s. 3种算法瞬时队列长度、丢包率和吞吐量的仿真曲线分别如图2~图4所示. 由图2可以看出, 本文所提算法抖振较小, 响应时间较短, 另两种算法由于数据在缓存中的大量囤积, 导致缓冲溢出和丢包. 由于本文所提算法使整个网络收敛到一个对于汇聚节点4而言合适的的数据发送速率, 即在节点4上达到数据收发的平衡, 能够快速调整数据发送速率, 抑制数据包在缓存中的堆积, 缓解网络拥塞的发生, 从而提高了整个网络的吞吐量. 虽然在初始时刻本文方法的输入值较大, 但如果以 $J = \sum \|u_i\|$ 作为控制引起能量消耗的评价指标, 则本文提出算法消耗能量明显小于其他两种算法.

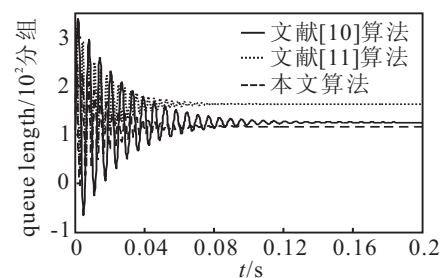


图2 队列长度仿真结果

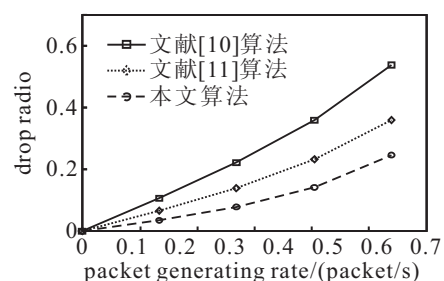


图3 不同数据包发送速率下的丢包率

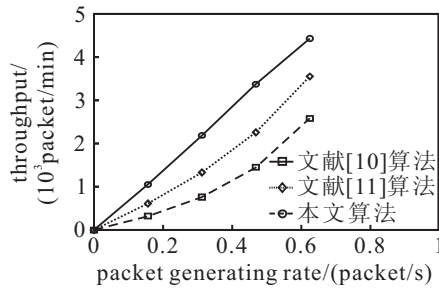


图4 不同数据包发送速率下的吞吐量

5 结论

本文基于滑模控制提出了一种适用于传输层节点级拥塞和链路层链路级拥塞同时存在的无线传感器网络拥塞控制算法,并对滑动模态参数选取范围进行限定,实现了无线传感器网络跨层拥塞控制协议的设计。基于滑模控制的WSN控制算法能够有效降低队列排队时间,避免拥塞的发生,并保持了较低的能耗。

参考文献(References)

- [1] 孙利民,李波,周新运.无线传感器网络的拥塞控制技术[J].计算机研究与发展,2008,45(1):63-72.
(Sun L M, Li B, Zhou X Y. A survey of congestion control technology for wireless sensor networks[J]. J of Computer Research and Development, 2008, 45(1): 63-72.)
- [2] Ee C T, Bajcsy R. Congestion control and fairness for many to one routing in sensor networks[C]. Proc of the 2nd Int Conf on Embedded Networked Sensor Systems. Baltimore: Association for Computing Machinery, 2004: 148-161.
- [3] Yi Y, Shakkottai S. Hop-by-hop congestion control over a wireless multihop network[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2007, 15(1): 133-144.
- [4] 杨歆豪,陆锦军,王执铨.无线传感器网络中基于最小速率的拥塞控制算法[J].信息与控制,2010,39(5):513-518.
(Yang X H, Lu J J, Wang Z Q. Congestion control algorithm based on min-rate in wireless sensor network[J]. Information and Control, 2010, 39(5): 513-518.)
- [5] Maciej Zawodniok, Sarangapani Jagannathan. Predictive congestion control protocol for wireless sensor networks[J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2007, 6(11): 3955-3963.
- [6] 石为人,唐云建,王燕霞.基于拥塞控制的无线传感器网络数据汇集树生成算法[J].自动化学报,2010,36(8):823-828.
(Shi W R, Tang Y J, Wang Y X. Data gather tree algorithm based on congestion control in wireless sensor networks[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(8): 823-828.)
- [7] Ouyang Ying, Lin Chuang, Ren Feng-yuan, et al. Design and analysis of a backpressure congestion control algorithm in wireless sensor network[C]. The 8th Int Conf on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies. Adelaide: University of Adelaide, 2007: 413-420.
- [8] Zbigniew Galias, Yu Xing-huo. Study of periodic solutions in discretized two-dimensional sliding-mode control systems[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems-II: Express Briefs, 2011, 58(6): 381-385.
- [9] Tan Guang-jun, Kou Bao-quan, Wu Hong-xing, et al. Dynamic sensorless detection of linear electromagnetic UAV launch[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2011, 39(1): 399-404.
- [10] Wang Chong-gang, Sohrawy, Lawrence K, et al. Priority-based congestion control in wireless sensor networks[C]. IEEE Int Conf on Sensor Networks, Ubiquitous and Trustworthy Computing. Taichung: IEEE Computer Society, 2006, 1: 22-31.
- [11] Li Zhi-bin, Peter X L. Priority-based congestion control in multi-path and multi-hop wireless sensor networks[C]. Proc of the 2007 IEEE Int Conf on Robotics and Biomimetics. Sanya: IEEE Press, 2007: 658-663.
- [5] Sajan Abdul, Liu Guang-jun. Decentralised fault tolerance and fault detection of modular and reconfigurable robots with joint torque sensing[C]. IEEE Int Conf on Robotics and Automation. Pasadena, 2008: 3520-3526.
- [6] 李英,朱明超,李元春.可重构机械臂模糊神经网络补偿控制[J].吉林大学学报:工学版,2007,37(1):206-211.
(Li Y, Zhu M C, Li Y C. Neuro fuzzy compensation control for reconfigurable manipulator[J]. J of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007, 37(1): 206-211.)
- [7] Jin J H, Ko S H, Ryou C K. Fault tolerant control for satellites with four reaction wheels[J]. Control Engineering Practice, 2008, 16(10): 1250-1258.
- [8] Zhu Ming-chao, Lu Peng, Zhu Lu, et al. Direct adaptive fuzzy decentralized control for reconfigurable modular manipulator[C]. The 29th Chinese Control Conf. Beijing, 2010: 2503-2508.

(上接第450页)