

文章编号: 1001-0920(2012)09-1348-05

无线传感器网络中基于领导者的拥塞控制算法

杨歆豪¹, 李泽²

(1. 苏州大学 机电工程学院, 江苏 苏州 215006; 2. 苏州科技学院 机电工程系, 江苏 苏州 215009)

摘要: 针对无线传感器网络存在的拥塞问题, 设计一种基于领导者的拥塞控制算法. 利用分布式动态系统的理论对拥塞问题进行建模, 并证明了所提出的算法能够保证所有节点的发送速率收敛到可用的最小带宽, 同时利用 Lyapunov 函数证明了所提出的算法在变拓扑网络结构下的有效性. 仿真实验表明, 基于领导者的拥塞控制算法能够很好地抑制无线传感器网络中的拥塞现象, 保证较高的吞吐量和较低的网络延时, 提高整个网络的服务质量.

关键词: 无线传感器网络; 网络拥塞控制; 分布式动态系统; 可用带宽

中图分类号: TP393

文献标志码: A

Congestion control algorithm based on leader for wireless sensor network

YANG Xin-hao¹, LI Ze²

(1. School of Mechanical and Electric Engineering, Soochow University, Suzhou 215006, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China.

Correspondent: YANG Xin-hao, E-mail: yangxinhao@163.com)

Abstract: The congestion control algorithm based on leader is designed for network congestion of wireless sensor network. The congestion problem is modeled by using the theory of distributed dynamic system, which can prove that the send rate for all nodes converges to the minimal available bandwidth by using the proposed congestion control algorithm. By using Lyapunov function, the effectiveness of the proposed algorithm is proved under the varying network topology. Simulation results show that the proposed algorithm restrains the congestion in wireless sensor network, maintains high throughput and low delay time, and improves the quality of serve for the whole network.

Key words: wireless sensor network; network congestion control; distributed dynamic system; available bandwidth

1 引言

无线传感器网络(WSN)是近几年网络领域的研究热点之一^[1], 主要用来协作地感知、采集和处理感知对象的信息并按照一定的路径传送给监控节点. 无线传感器网络具有大规模密集部署、节点资源受限、无线带宽小、拓扑结构动态变化等特点^[2]. 由于传感器节点的大量部署, 许多节点可能同时感知信息并从不同区域流向汇聚节点, 这种网络流量的不均衡特性本身便决定了汇聚节点往往会成为通信的瓶颈, 在汇聚节点附近容易出现拥塞现象. 另一方面, 共享无线信道的节点之间的竞争和通信干扰会随着数据量的增大而增大, 也会导致网络拥塞的发生. 拥塞将导致丢包率增加, 影响传输可靠性, 同时会降低吞吐量, 浪费能量资源. 因此, 有效控制拥塞是传感器网络

研究中亟待解决的一个关键问题.

一些已经存在的数据传输机制能够调整传输层的数据流量, 例如当发生网络拥塞时可采用直接扩散的方式摆脱拥塞^[3]. 文献[4]将丢失率作为一个衡量网络拥塞的信号, 这对于信道错误率较高的无线网络而言误差较大, 而且文中主要偏重的是传输数据包的公平性. 文献[5]提出了ESRT方法, 用以控制网络的拥塞, 它需要通过基站反馈可信度信号来调整网络节点发包的速率, 该机制存在控制不稳定、开销大、反馈机制慢的缺点. 文献[6]提出可通过 r/n 的比值来调整发送数据的速率, 但文中没有充分考虑不同子节点的流量. 文献[7]利用Lyapunov drifts方法^[8]设计了一个分布式的背压算法, 并给出了物理实现, 但需要调整较多的参数.

收稿日期: 2011-03-24; 修回日期: 2011-06-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60974016, 60974129, 70931002); 江苏省自然科学基金项目(BK2008188, BK2009388).

作者简介: 杨歆豪(1983—), 男, 讲师, 从事网络拥塞控制等研究; 李泽(1983—), 女, 讲师, 从事控制理论的研究.

无线传感器网络中汇聚节点处数据量的大量堆积, 容易形成瓶颈路由器, 所以大部分现有的拥塞控制算法都将主要精力放在无线传感器网络中的汇聚节点处, 从而在算法设计过程中对网络拓扑的建模都是基于二叉树的. 由于无线传感器网络采用多跳的数据传输方式, 其拓扑结构更像是一个分布式动态系统; 而汇聚节点的可用带宽又决定了数据传输的速率, 就像是一个作出决策的领导者. 本文基于图论对无线传感器网络拓扑进行建模, 通过分布式动态系统的一致性问题, 设计了一个基于领导者的拥塞控制算法(CCBL). 仿真实验表明, 本文提出的CCBL算法能够很好地抑制无线传感器网络中的拥塞现象, 保证较高的吞吐量和较低的网络延时, 提高整个网络的服务质量(QoS).

2 无线传感器网络的拥塞模型

无线传感器网络采用多跳的数据传输方式, 其拓扑结构更像是一个分布式动态系统, 所以本文基于有向图的基本理论对无线传感器网络的拓扑进行建模. 假设在整个传感器网络中有 n 个传感器节点和 1 个汇聚节点. 由于整个网络中的传感器节点具有相同的重要性, 首先定义 1 个 n 阶有向图 $\bar{G} = (V, E, A, x)$, 如图 1 所示. 节点集 $V = \{v_i, i \in L = \{1, 2, \dots, n\}\}$, 边集 $E = \{e_{ij} = (i, j)\}$, 加权邻接矩阵 $A = [a_{ij}] \in R^{n \times n} (i, j \in L, i \neq j)$. 定义 v_i 为无线传感器网络中的传感器节点, 当节点 v_i 与 v_j 之间进行通讯时, 认为 2 个节点之间是可到达的; 否则, $e_{ij} \notin E$. 数据集 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 代表网络中所有传感器节点的数据发送速率, 是一个随时间变化的变量. 定义加权有向图 \bar{G} 中的加权值 a_{ij} 满足

$$a_{ij} = \begin{cases} 0.5, & e_{ij} \in E; \\ 0, & e_{ij} \notin E. \end{cases}$$

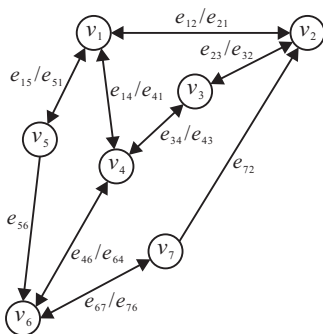


图 1 有向图 \bar{G}

在无线传感器网络中, 大量的信息从不同区域流向汇聚节点, 在汇聚节点处容易导致拥塞的发生; 因此, 根据汇聚节点的负载状况合理地调节所有传感器节点的数据发送速率, 可以有效地抑制拥塞. 作者认为, 汇聚节点 v_0 与图 \bar{G} 中的一些节点直接相连接, 其

数据发送速率是 x_0 . 当有多个节点向汇聚节点传递信息时, 可以根据其不同的优先级分配数据发送速率, 即不同的信息传输任务的数据发送速率是不同的, 这便意味着不同通信任务感知到的 x_0 是不同的. 定义节点 $v_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 与汇聚节点 v_0 的连接权重 b_i 满足

$$b_i = \begin{cases} 0.75, & \text{node } i \text{ connecting to the node } 0; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

这里设置汇聚节点具有较高的权重是因为在无线传感器网络中数据经过传感器节点之间的多跳后路由到汇聚节点, 最后通过互联网或卫星到达终端. 汇聚节点作为无线传感器网络监测区域中的最后一环, 在整个网络中需处理的数据量较多, 所以应具有较高的加权值.

根据上述讨论, 可以认为整个无线传感器网络是一个包括 n 个节点和 1 个领导者的加权有向图 G , 其中包括子图 \bar{G} 和 1 个与图 \bar{G} 中某些节点相连接的领导者 v_0 . 在无线传感器网络中, 只有当信道空闲时 2 个节点之间才能进行通讯; 正在通讯的 2 个节点也会因为信道变忙, 从而执行退避算法. 换言之, 对于有向图 G , 在某些时刻新的边 e_{ij} 被添加进图 G 或者已有的边 e_{ij} 被移除出图 G ; 因此, 可以将无线传感器网络看作一系列具有相同节点数、不同拓扑的有向图 $G^{(l)}$ 的集合. 定义图集 $G_n = \{G^{(l)}: \text{有向图 } G^{(l)} \text{ 有 } n \text{ 个节点和 1 个领导者}\}$, 因为在 $n + 1$ 个节点的有向图中最多只有 $2^{(n+1)n}$ 种不同的拓扑, 所以图集 G_n 是 1 个有限集合. 然而, 在实际的无线传感器网络中, 2 个节点之间的通讯是双向的, 这便意味着边 e_{ij} 与 e_{ji} 必然成对出现, 而且由于任意节点的有效通讯范围有限, 当网络中节点个数较多或者网络覆盖环境较大时, 可以与节点 i 直接通讯的节点的个数远远小于 n . 因此, 根据实际网络结构构造的图集 G_n 中的子图个数远远小于 $2^{(n+1)n}$. 定义 $S = \{1, 2, \dots, N\}$ 是图集 G_n 中子图的个数, 为了描述无线传感器网络的动态拓扑, 定义切换信号 $\varepsilon(t) : [0, \infty) \rightarrow S$. 网络拓扑的动态变化导致权重 a_{ij} 和 b_i 也是时变的, 并且图 $G^{(s)}$ 子图的 Laplacian 矩阵 $L_s (s \in S)$ 也是时变的, 但在时间间隔 $[t_i, t_{i+1})$ 内网络维持不变, 即 $L_s (s \in S)$ 只在 $t_i (i = 0, 1, \dots)$ 时刻可能会根据切换信号 $\varepsilon(t)$ 发送切换. 这是因为, 当整个网络拥塞不很严重时, 一个传输任务不会不停地切换新的路径, 并且由于传播延时的存在, 在足够小的时间间隔 $[t_i, t_{i+1})$ 内网络拓扑维持不变.

3 基于领导者的拥塞控制算法

整个无线传感器网络中路由器的数据发送速率的加速度满足

$$\dot{x}_i = u_i,$$

$$u_i = -\beta \left[\sum_{j \in N_i(t)} a_{ij}(t)(x_i - x_j) + b_i(t)(x_i - x_0) \right]. \quad (1)$$

其中: N_i 是节点 i 的邻居节点集, x_0 是领导者 v_0 的数据发送速率, β 是加速度控制系数.

定义 a_{ij}^s 和 b_i^s 是图 $G^{(s)}$ 的权重, 则在时间间隔 $[t_i, t_{i+1})$ 内, 式 (1) 可以改写为

$$\dot{x} = -\beta(\mathbf{L}_s + \mathbf{B}_s)x + \beta\mathbf{B}_s\mathbf{1} \otimes x_0. \quad (2)$$

其中

$$\mathbf{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix}_{n \times 1}, \quad \mathbf{B}_s = \begin{bmatrix} b_1^s & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & b_2^s & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & b_n^s \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^n a_{1j}^s & -a_{12}^s & \cdots & -a_{1j}^s & \cdots & -a_{1n}^s \\ -a_{21}^s & \sum_{j=1}^n a_{2j}^s & \cdots & -a_{2j}^s & \cdots & -a_{2n}^s \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{i1}^s & -a_{i2}^s & \cdots & \sum_{j=1}^n a_{ij}^s & \cdots & -a_{in}^s \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{n1}^s & -a_{n2}^s & \cdots & -a_{nj}^s & \cdots & \sum_{j=1}^n a_{nj}^s \end{bmatrix}.$$

引理 1 矩阵 \mathbf{L} 是 n 阶有向图 G 的 Laplacian 矩阵, 定义 $\lambda_1(\mathbf{L}) \leq \lambda_2(\mathbf{L}) \leq \cdots \leq \lambda_n(\mathbf{L})$ 是矩阵 \mathbf{L} 的特征值, 则 $\lambda_1(\mathbf{L}) = 0$, 且其特征向量为 $\mathbf{1} = [1, 1, \cdots, 1]^T$.

引理 1 的证明可参见文献 [9], 此略.

定义 $\varepsilon = x - \mathbf{1} \otimes x_0$, 则有

$$\begin{aligned} & -(\beta\mathbf{L}_s + \mathbf{B}_s)x + \beta\mathbf{B}_s\mathbf{1} \otimes x_0 = \\ & -\beta(\mathbf{L}_s + \mathbf{B}_s)\varepsilon + \beta\mathbf{L}\mathbf{1} \otimes x_0 = \\ & -\beta(\mathbf{L}_s + \mathbf{B}_s)\varepsilon. \end{aligned}$$

由式 (2), 可以得到系统的误差微分方程

$$\dot{\varepsilon} = -\beta(\mathbf{L}_s + \mathbf{B}_s)\varepsilon. \quad (3)$$

引理 2 如果图 G 是连通的, 则对称矩阵 $\mathbf{M} = \mathbf{L} + \mathbf{B}$ 是正定的, \mathbf{L} 和 \mathbf{B} 的形式与 \mathbf{L}_s 和 \mathbf{B}_s 相同.

引理 2 的证明可参见文献 [9], 此略.

定理 1 如果存在正定矩阵 \mathbf{P} , 满足 \mathbf{P} 与 \mathbf{M}_s ($\mathbf{M}_s = \mathbf{L}_s + \mathbf{B}_s$) 具有相同的特征向量, 则对于任意的 $\beta > 0$, 当加权有向图 \bar{G} 保持联通性时, 系统误差 $\varepsilon(t)$ 满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \varepsilon(t) = 0$, 且 $\varepsilon(t)$ 的指数收敛速度为 $\beta\lambda_1(\mathbf{M}_s)$, 其中 $\lambda_1(\mathbf{M}_s)$ 是矩阵 \mathbf{M}_s 的最小特征值.

证明 虽然有向图 \bar{G} 是时变的, 但在时间间隔

$[t_i, t_{i+1})$ 内加权有向图 \bar{G} 的拓扑保持不变(前文已经证明).

设误差系统的 Lyapunov 函数为

$$V(\varepsilon) = \varepsilon^T \mathbf{P}\varepsilon, \quad (4)$$

则

$$\dot{V}(\varepsilon) = -2\beta\varepsilon^T \mathbf{P}\mathbf{M}_s\varepsilon. \quad (5)$$

定义 $\lambda(\mathbf{M}_s)$ 是矩阵 \mathbf{M}_s 的特征值, 满足

$$\lambda_1(\mathbf{M}_s) \leq \lambda_2(\mathbf{M}_s) \leq \cdots \leq \lambda_{\bar{k}}(\mathbf{M}_s),$$

同理, 矩阵 \mathbf{P} 的特征值满足

$$\lambda_1(\mathbf{P}) \leq \lambda_2(\mathbf{P}) \leq \cdots \leq \lambda_{\bar{k}}(\mathbf{P}),$$

则正定矩阵 \mathbf{M}_s 和 \mathbf{P} 的酉变换为

$$\begin{cases} \mathbf{P} = \mathbf{U}_p^{-1} \text{diag}\{\lambda_1(\mathbf{P}), \lambda_2(\mathbf{P}), \cdots, \lambda_{\bar{k}}(\mathbf{P})\} \mathbf{U}_p, \\ \mathbf{M}_s = \\ \mathbf{U}_{M_s}^{-1} \text{diag}\{\lambda_1(\mathbf{M}_s), \lambda_2(\mathbf{M}_s), \cdots, \lambda_{\bar{k}}(\mathbf{M}_s)\} \mathbf{U}_{M_s}. \end{cases}$$

其中 \mathbf{U}_p 和 \mathbf{U}_{M_s} 分别是正定矩阵 \mathbf{M}_s 和 \mathbf{P} 的酉矩阵. 又因为正定矩阵 \mathbf{P} 和 \mathbf{M}_s 具有相同的特征向量, 即 $\mathbf{U}_p = \mathbf{U}_{M_s}$, 所以

$$\begin{aligned} \mathbf{P}\mathbf{M}_s &= \\ \mathbf{U}_p^{-1} \text{diag}\{\lambda_1(\mathbf{P}), \lambda_2(\mathbf{P}), \cdots, \lambda_{\bar{k}}(\mathbf{P})\} \mathbf{U}_p \times \\ \mathbf{U}_{M_s}^{-1} \text{diag}\{\lambda_1(\mathbf{M}_s), \lambda_2(\mathbf{M}_s), \cdots, \lambda_{\bar{k}}(\mathbf{M}_s)\} \mathbf{U}_{M_s} &= \\ \mathbf{U}_p^{-1} \text{diag}\{(\lambda_1(\mathbf{P})\lambda_1(\mathbf{M}_s)), (\lambda_2(\mathbf{P})\lambda_2(\mathbf{M}_s)), \cdots, \\ (\lambda_{\bar{k}}(\mathbf{P})\lambda_{\bar{k}}(\mathbf{M}_s))\} \mathbf{U}_{M_s} &> 0. \end{aligned} \quad (6)$$

因此, 当 $\beta > 0$ 时, 式 (5) 满足

$$\dot{V}(\varepsilon) = -2\beta\varepsilon^T \mathbf{P}\mathbf{M}_s\varepsilon < 0.$$

因为矩阵 \mathbf{P} 的特征值满足 $\lambda_1(\mathbf{P}) \leq \lambda_2(\mathbf{P}) \leq \cdots \leq \lambda_{\bar{k}}(\mathbf{P})$, 所以

$$\lambda_1(\mathbf{P})\|\varepsilon\|^2 \leq V(\varepsilon) \leq \lambda_{\bar{k}}(\mathbf{P})\|\varepsilon\|^2. \quad (7)$$

由不等式 (7), 得

$$\sqrt{\frac{V(\varepsilon)}{\lambda_{\bar{k}}(\mathbf{P})}} \leq \|\varepsilon\| \leq \sqrt{\frac{V(\varepsilon)}{\lambda_1(\mathbf{P})}}.$$

由式 (5)~(7), 得

$$\begin{aligned} \dot{V}(\varepsilon) &= -2\beta\varepsilon^T \mathbf{P}\mathbf{M}_s\varepsilon \leq -2\beta\lambda_1(\mathbf{P})\lambda_1(\mathbf{M}_s)\|\varepsilon\|^2 \leq \\ & -2\beta\lambda_1(\mathbf{M}_s)V(\varepsilon). \end{aligned}$$

解微分方程得

$$V(\varepsilon(t)) \leq V(\varepsilon(t_i))e^{-2\beta\lambda_1(\mathbf{M}_s)t-t_i}, \quad t \in [t_i, t_{i+1}).$$

当 $t_0 = 0$ 时

$$V(\varepsilon(t)) \leq V(\varepsilon(0))e^{-2\beta\lambda_1(\mathbf{M}_s)t} \Rightarrow$$

$$\|\varepsilon(t)\| \leq \sqrt{\frac{\lambda_{\bar{k}}(\mathbf{P})}{\lambda_1(\mathbf{P})}} \|\varepsilon(0)\| e^{-\beta\lambda_1(\mathbf{M}_s)t}.$$

所以当 $t_0 = 0$ 时 $\varepsilon(t)$ 以指数收敛速度收敛到零. \square

定理 1 通过 Lyapunov 函数证明了本文算法在变拓扑网络结构下能够保证系统误差收敛到零, 也就是

说网络中所有节点的数据发送速率收敛到领导者的数据发送速率, 从而保证整个无线传感网处于平衡状态, 避免拥塞.

4 算法仿真

本文采用 ns-2 验证 CCBL 算法的有效性. MAC 层采用 802.11 协议, 仿真环境是 300×300 m, 随机分布 200 个节点, 在网络中选取汇聚节点位于 (144,168), 整个模拟时长设为 300 s.

实验 1 本实验的目的是验证不同拥塞程度下 CCBL 算法的有效性. 随机选取 2, 5, 8 和 10 个节点作为数据源发送数据, 以生成不同负载下的网络环境. 表 1 给出了不同连接数下整个网络的吞吐量和数据包丢失率.

连接数	吞吐量/包			丢包率		
	无拥塞控制	文献 [7]	CCBL	无拥塞控制	文献 [7]	CCBL
2	7047	7052	6932	0.09	0.08	0.08
5	6457	6621	6655	0.3	0.25	0.26
8	8860	9023	9707	0.38	0.33	0.27
10	12.926	13.454	16.598	0.45	0.39	3.32

从表 1 可以看出, 本文的 CCBL 算法使整个网络收敛到一个对于汇聚节点而言合适的数据发送速率, 从而减少了数据在路由器缓存中的囤积. 因为无线传感器网络具有许多节点同时感知信息并从不同区域流向汇聚节点的特点, 在汇聚节点附近数据的大量交换很容易导致网络拥塞的发生, 所以 CCBL 算法能够更好地适应无线传感器网络. 无线传感器网络的另一特点是对能耗有着较高的要求. 文献 [10] 给出了损耗参数 η 的定义, 并通过它来衡量整个网络的能量效率. 表 2 给出了在不同发送速率下的损耗参数 η , 从表 2 可以看出, CCBL 算法具有较小的能量损失.

表 2 不同发送速率下的损耗参数 η

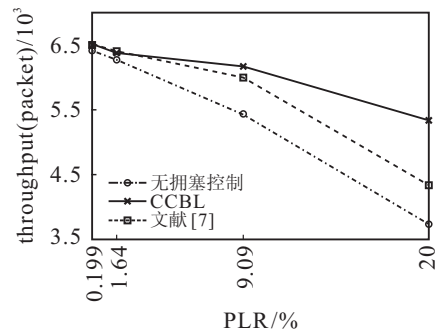
算法	time interval/s			
	0.02	0.05	0.08	0.10
无拥塞控制	1.857	0.923	0.667	0.235
CCBL	1.101	0.614	0.558	0.222

实验 2 实验的目的是研究本文提出的 CCBL 算法在具有信道错误的链路上的性能. 因为无线网络信道具有易受环境影响, 随机比特出错率高的特点, 所以考虑信道错误更能真实地反映无线传感器的特征. 这里通过一个 Gilbert 模型^[11]来构造无线链路中的数据丢失率 (PLR). 表 3 给出了实验中所涉及的不同数据丢失率. 其中: p 表示从“好”状态 (0% PLR) 转移到“坏”状态 (100% PLR) 的概率, q 表示从“坏”状态 (0% PLR) 转移到“好”状态 (100% PLR) 的概率.

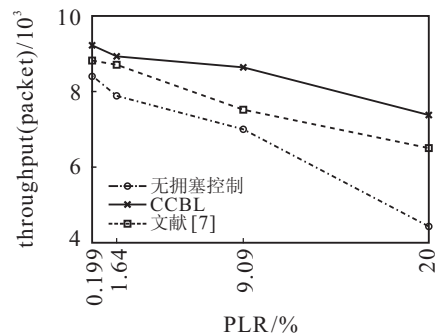
表 3 仿真中的不同 PLR 系数

p	q	packet loss rate (PLR) / %
0.001	0.5	0.199
0.01	0.6	1.64
0.05	0.5	9.09
0.1	0.4	20

图 2 给出了当连接数分别为 2 和 8 时 (轻度拥塞和重度拥塞) 不同 PLR 下整个网络的吞吐量. 传统的 TCP 协议中将丢包作为拥塞发生的标志, 从而会将由于无线信道错误而导致的丢包误认为是网络发生拥塞, 错误地减小源端的发送速率. 本文提出的 CCBL 算法根据整个网络中所有节点的可用带宽来调整发送速率, 可以避免由于信道错误带来的不必要的发送速率的降低, 提高整个网络的吞吐量和性能.



(a) 2个数据源



(b) 8个数据源

图 2 不同 PLR 下的吞吐量

图 3 给出了在不同的 PLR 条件下 300 s 仿真时间内数据传输的平均时延. 图 3 中没有考察网络中丢包的情况, 这是因为无线链路错误的存在, 使得丢包率不能很好地反映算法的性能.

实验 3 通过改变数据源开始和结束发送数据的时间来模拟一个动态的网络环境 (PLR 为 1.64%). 在开始的 0~60 s 之间没有出现紧急事件, 网络中仅有数据源 1, 数据源 2 和数据源 3 向汇聚节点发送数据包. 在 60~180 s 之间, 数据源 1 探测到紧急事件并激励数据源 4~数据源 8 开始向汇聚节点发送速率, 在 180 s 时数据源 4~数据源 8 结束发送; 在第 120 s 时, 数据源 2 也探测到紧急事件并迅速激励数据源 9 和数据源 10 开始传输数据, 并一直持续到第 240 s, 之

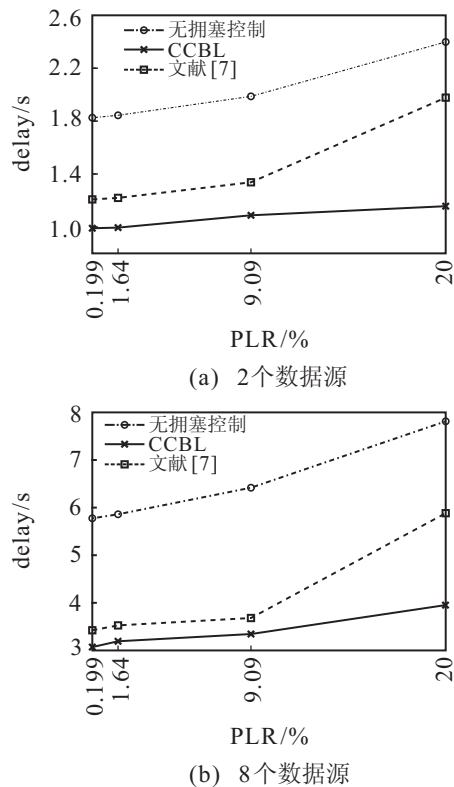


图 3 不同 PLR 下的平均延时

后恢复正常. 在整个模拟阶段, 数据源 3 一直保持常规发送速率. 这里数据源能够激励的节点是以数据源为中心、 $50 \times 50 \text{ m}$ 范围内的任意节点, 这样的设置会在局部形成瓶颈路由器, 从而导致拥塞现象. 表 4 给出了在本文提出的 CCBL 算法作用下 3 个数据源的吞吐量和平均时延. 由表 4 可以看出, 由于缓解了网络中的拥塞程度, 信道利用率得以提高, 吞吐量上升, 报文也无需太长的排队时间, 延时降低.

表 4 变网络环境下的吞吐量和平均延时

数据源	吞吐量/包			平均延时/s		
	无拥塞控制	文献[7]	CCBL	无拥塞控制	文献[7]	CCBL
1	2712	2884	3136	16.34	14.16	9.81
2	3069	3865	4263	14.97	12.69	11.32
3	4761	6072	7290	5.58	3.66	3.04

5 结 论

在无线传感器网络中, 由于网络流量的不均衡性, 不可避免地会发生拥塞现象. 拥塞将导致丢包率增加, 影响传输可靠性, 而且会降低吞吐率, 浪费宝贵的能量资源. 为此, 本文基于分布式动态系统的思想, 将无线传感器网络的拥塞问题归纳为一个最小收敛问题; 证明了所提出的 CCBL 算法可以保证在有限的时间内所有通讯节点的发送速率收敛到最小的数据发送速率; 并通过 Lyapunov 函数方法证明了在动态的网络环境下 CCBL 算法依然能够维持系统的稳定性. 但是, 本文提出的 CCBL 算法比较依赖于路由器

中的带宽分配协议, 一个较好的带宽分配协议可以提高 CCBL 算法的有效性. 因此, 如何给出一个合理的带宽分配协议尚有待进一步研究.

参考文献(References)

- [1] 孙利明, 李建中, 陈渝, 等. 无线传感器网络[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 1-424.
(Sun L M, Li J Z, Chen Y, et al. Wireless sensor networks[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 1-424.)
- [2] 李凌, 周兴社, 李士宁, 等. 基于无线传感器网络的拥塞控制算法的研究与比较[J]. 计算机应用研究, 2007, 16(3): 11-13.
(Li L, Zhou X S, Li S N, et al. Study and comparison of congestion control algorithms in wireless sensor network[J]. Application Research of Computers, 2007, 16(3): 11-13.)
- [3] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks[C]. Proc of the 6th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking(Mobicom 2000). New York, 2000: 56-67.
- [4] Woo A, Culler D. A transmission control scheme for media access in sensor networks[C]. Proc of the 7th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking(Mobicom 2001). Rome, 2001: 221-235.
- [5] Sankarasubramaniam Y, Akan O, Akyildiz I. Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks[C]. Proc of the 4th ACM Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing(MobiHoc 2003). Annapolis, 2003: 177-188.
- [6] Cheng Tien Ee, Ruzena Bajcsy. Congestion control and fairness for many-to-one routing in sensor networks[C]. Proc of the 2nd Int Conf on Embedded Networked Sensor Systems. New York, 2004: 148-161.
- [7] Sridharan A, Moeller S, Krishnamachari B. Making distributed rate control using Lyapunov drifts reality in wireless sensor networks[C]. The 6th Int Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks and Workshops, 2008(WiOPT 2008). Berlin, 2008: 452-461.
- [8] Georgiadis L, Neely M J, Tassiulas L. Resource allocation and cross-layer control in wireless networks(foundations and trends in networking)[M]. Boston: Now Publishers Inc, 2006: 1-144.
- [9] Hong Y G, Hu J P, Gao L X. Tracking control for multi-agent consensus with an active leader and variable topology[J]. Automatica, 2006, 42(7): 1177-1182.

(下转第1358页)