

基于压缩感知的拥塞控制机制

牛玉刚, 甘峰浩, 胡源

(华东理工大学 化工过程先进控制和优化技术教育部重点实验室, 上海 200237)

摘要: 针对无线传感网络(WSN)的拥塞问题, 提出一种压缩感知与速率控制相结合的拥塞缓解方法. 针对局部拥塞, 通过开环逐条反压机制调整上游节点的发送速率, 从而快速缓解局部拥塞; 针对全局拥塞, 各节点采用压缩感知的方法采集数据, 减小采集信息的冗余, 从而缓解全局性拥塞. 拥塞缓解后, 节点正常采样, 以此来保证数据的真实性. 仿真结果表明, 该方法对 WSN 的拥塞具有较好的控制效果.

关键词: 无线传感网络; 拥塞控制; 压缩感知; 速率调节

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Congestion control mechanism in WSN based on compressive sensing

NIU Yu-gang, GAN Feng-hao, HU Yuan

(Key Lab Advanced Control and Optimization for Chemical Process of Ministry of Education, East China University of Science Technology, Shanghai 200237, China. Correspondent: NIU Yu-gang, E-mail: acniuyg@ecust.edu.cn)

Abstract: A congestion control mechanism which combines compressive sensing and rate control is proposed to solve the congestion problem of wireless sensor network(WSN). For local congestion, by using open-loop hop-by-hop backpressure mechanism, the send rate of the upstream node is adjusted to relief local congestion quickly. For global congestion, the compressive sensing technology is used to reduce redundancy information, thus relieving network congestion. To guarantee the authenticity of information, information is collected in the normal mode after the congestion relieved. Simulation shows that the mechanism achieves better Qos in terms of throughput, latency and energy consumption.

Keywords: WSN; congestion control; compressive sensing; rate control

0 引言

无线传感网络(WSN)在环境检测、工业控制、医疗健康等领域有着广泛的应用^[1], 然而, 其开放的无线链路、节点资源有限、节点广泛部署等特点容易造成拥塞^[2]. 拥塞会引起能耗增加、Qos服务质量下降^[3]. 因此, 如何有效避免或控制拥塞是当前 WSN 的研究热点.

由于 WSN 以数据为中心且资源有限, 使得传统的传输控制方案(TCP、UDP等)不能有效地用于 WSN 的拥塞控制问题^[4]. 近年来, 人们提出了许多针对 WSN 的拥塞控制方案, 其中 CODA 协议^[5]是一种基于速率控制的拥塞控制协议. 在 CODA 协议中采用信道占用率和缓存利用率两种方法进行拥塞检测, 而拥塞缓解则采用本地丢弃、转发速率控制以及闭环多源速率控制机制相结合的方法. ESRT 协议^[6]是一种

将 WSN 的数据传输可靠性与拥塞控制相结合的拥塞控制方案, 中心节点根据当前网络传输的可靠性和接收到的拥塞通知消息来调整网络节点的发送速率以缓解拥塞, 但其中心节点对所有节点都进行相同的操作, 不能针对不同的拥塞状况区分对待, 且拥塞控制由中心节点统一进行, 会造成响应时间较长等缺陷. CCBL 算法利用分布式动态系统的理论对网络拓扑进行建模, 通过将网络节点的发送速率收敛到可用的最小带宽来保证整个网络处于平衡状态以避免拥塞^[7].

针对已有拥塞控制机制很少通过数据处理来缓解拥塞的状况, 本文提出一种基于压缩感知与速率调节的 WSN 拥塞控制机制(CS-Rate CONTROL). 当网络局部拥塞时, 拥塞节点通过开环逐条反压机制快速调节上游节点发送数据速率, 避免局部拥塞范围的进

收稿日期: 2014-01-15; 修回日期: 2014-06-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61273073).

作者简介: 牛玉刚(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事随机系统、网络拥塞控制、网络控制系统等研究; 甘峰浩(1990—), 男, 硕士生, 从事无线传感网络拥塞控制的研究.

一步扩张. 当网络发生持久性的拥塞时, 将引起全局性拥塞, 此时, 节点通过压缩感知的方法采样数据, 在满足用户需求的同时采集更精简的信息, 从而通过降低数据传输量来缓解全局性拥塞. 当网络拥塞状况缓解后, 对采集到的数据将不再进行压缩感知处理, 从而避免因信号稀疏性不好等原因造成信号失真.

1 压缩感知与速率调节机制

1.1 速率调节机制

WSN中的热点区域和突发数据流等可能会造成网络产生局部拥塞. 当出现局部拥塞时应迅速将其消除, 以避免拥塞状况的进一步恶化. 节点通过检测队列长度判断是否产生拥塞, 当检测到发生拥塞时, 通过开环逐条反压机制通知上游节点调节发送速率. 上游节点收到拥塞通知消息后, 参考当前的发送速率 f_r 对其进行调整.

设期望的发送速率为 f , T 为速率更新周期.

1) 当上游节点收到拥塞消息时, 若 $f_r \geq f$, 则表明当前发送速率过高而且引起了下游节点的拥塞, 因此节点的发送速率需要较大程度地降低, 才能将网络快速地恢复到正常传输状态. 参考 AIMD 机制, 通过将发送速率降低为当前速率的一半来缓解拥塞, 即

$$f_r = \frac{f_r}{2}. \quad (1)$$

2) 当上游节点收到拥塞通知消息时, 若 $\alpha f \leq f_r < f$, 则表明当前发送速率不是太高, 但下游节点产生了拥塞, 可能是因为一些突发流或随机干扰造成的. 为保证当前采集数据的可靠性, 应较平缓地降低发送速率, 可通过下式进行线性调节发送速率:

$$f_r = f_r - \delta f. \quad (2)$$

其中: $0.5 \leq \alpha < 1$ (由网络规模和拓扑结构等确定); δ 为速率调节系数, $0.1 \leq \delta \leq 0.2$.

3) 当节点收到拥塞通知消息时, 若 $0 < f_r < \alpha f$, 则表明当前速率已经较低, 下游节点产生拥塞可能是因为前两种方法调节有一些延时, 或其他节点速率较高造成的. 此时, 为了保证采集数据的可靠性, 当前的发送速率应保持不变, 即

$$f_r = f_r. \quad (3)$$

4) 当下游拥塞缓解后, 需要将上游节点发送速率恢复到期望发送速率, 从而满足对采集数据的可靠性要求. 当在时间 T 内节点没有收到拥塞通知消息且 $f_r < f$ 时, 需要通过下式线性增加节点的发送速率:

$$f_r = f_r + \gamma f, \quad (4)$$

其中 γ 为速率恢复系数, $0 < \gamma \leq 0.5$.

1.2 数据压缩感知机制

压缩感知技术 (CS)^[8] 是一种新的信号采样技术. 它通过利用信号稀疏性, 使得信号采样频率在远小于 Nyquist 采样率的情况下, 从线性观测数据中通过非线性的优化算法恢复出原信号.

WSN的逐条传输和集中式收集数据等特点使得网络容易产生“漏斗效应”, 即越靠近中心节点的节点需要转发的数据越多, 这种数据流量的不均衡性会造成越靠近中心节点的区域越容易产生拥塞. 另一方面, 只要 WSN 传输的数据信息能够满足应用要求, 节点就可丢弃冗余数据或融合出更有效的信息进行传输^[9].

将压缩感知方法运用到 WSN 中能很好地克服“漏斗效应”带来的网络拥塞. 以线性拓扑结构为例, 假设在不压缩状态下进行传输, 设 node i 采集数据为 x_i , node 1 传输 x_1 到 node 2, node 2 需要传输 x_1 和 x_2 两个数据包, node N 则需要传输 N 个数据包到中心节点, 即越靠近中心节点需要传输数据越多. 如图 1 所示, 若采用压缩感知方法压缩后进行传输, 则 node 1 将采集数据乘以观测向量后需要传输一个大小为 M ($M \ll N$) 的数据到 node 2, node 2 只需将自己的采集数据乘以对应观测向量后加到 node 1 传来的数据上, 即 node 2 向 node 3 也只需要传输一个大小为 M 的数据包. 同样, node N 也只需要传输大小为 M 的数据包到中心节点. 每个节点传输的数据量都是相同的, 网络负载均衡分布, 能够很好地避免 WSN 的“漏斗效应”, 克服越靠近中心节点的区域越容易产生拥塞的缺陷.

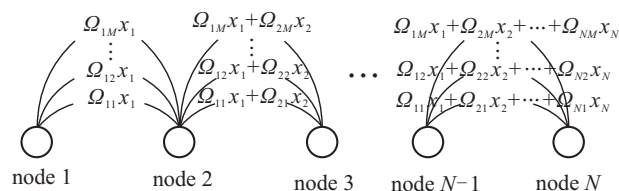


图 1 线性拓扑 WSN 中 CS 机制

对采集数据进行压缩感知处理时, 将 WSN 中某传输路径上每个节点采集到的信号作为原始信号的一个元素. 假设某条传输路径上有 N 个节点采集数据, 即 N 个节点某一时刻采集的信号为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$. 本文选择高斯随机噪声矩阵作为观测矩阵. 每个传感器节点根据自己的节点 ID 等信息为种子产生随机的观测向量, 设第 i 个节点产生随机观测向量为 $\Omega_i = [\Omega_{i1}, \Omega_{i2}, \dots, \Omega_{iM}]^T \in R^M$, 则 $\Omega = [\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N]$. 终端恢复信号时同样以每个节点的 ID 等信息将对应的观测矩阵 Ω 重构出来.

对信号 X 进行投影观测得到 $Y = [y_1, y_2, \dots,$

$y_M]^T$, 有

$$Y = \Omega X, \quad (5)$$

从而可得

$$Y = \Omega_1 x_1 + \Omega_2 x_2 + \cdots + \Omega_N x_N. \quad (6)$$

由式(6)可知, 通过压缩观测后信号 Y 就是每个节点采集的信号与观测向量乘积的和. 以线性拓扑为例(如图1所示), 节点在传送数据时, 每个节点采集信息后将本地采集的信号 x_i 乘以该节点的观测向量 Ω_i , 父节点收到子节点的数据后, 只需要将自己的数据 $x_{i+1}\Omega_{i+1}$ 加到子节点传来的数据中即可, 最终中心节点收到的即是 $Y = \Omega_1 x_1 + \Omega_2 x_2 + \cdots + \Omega_N x_N$.

在节点大规模部署的 WSN 中, 信号之间有一定的稀疏性, 可通过小波变换将信号进行稀疏表示. 由压缩感知理论知, 当观测矩阵中 M 满足下式时:

$$M \geq C\mu^2(\Omega, \varphi)k \log N, \quad (7)$$

$$\mu(\Omega, \varphi) = \sqrt{N} \max_{1 \leq k, j \leq N} \|\Omega_k^T \varphi_j\|, \quad (8)$$

可通过求解以下最优问题将信号以较高的概率恢复出来:

$$\begin{cases} \min \|\theta\|_1, \\ \text{s.t. } \|\Omega\varphi\theta - Y\|_2 \leq \varepsilon, \end{cases} \quad (9)$$

其中 ε 为恢复容忍误差. 当拥塞缓解后, 如果一段时间 T_c 内没有收到拥塞消息, 则在下一时刻中心节点广播消息时, 通知网络节点对采集到的数据不做压缩感知处理, 从而减小因信号稀疏性不好等原因可能造成的数据失真, 保证数据的真实度需求.

1.3 CS-Rate CONTROL 机制

当网络局部拥塞时应快速进行控制, 以避免拥塞进一步扩大. 开环逐条反压机制具有快速响应的特点^[5], 因此当网络局部拥塞时, 通过开环逐条反压机制来快速缓解网络拥塞. 仍以图1为例, 距离 Sink 节点 i 跳的节点检测到拥塞, 若此时转换到压缩感知机制下缓解拥塞, 则需要时间为

$$t_c = \sum_{k=1}^i t_k + \sum_{k=1}^N t'_k.$$

其中: t_k 为传输到 Sink 节点时第 k 跳的时延, t'_k 为 Sink 通知源节点时第 k 跳的时延. 若通过开环逐条反压机制来缓解网络拥塞, 则需要时间最大为 $t_r = \sum_{k=i+1}^N t'_k$. 由 $t_c - t_r$ 可得

$$t_c - t_r = \sum_{k=1}^i t_k + \sum_{k=1}^N t'_k - \sum_{k=i+1}^N t'_k = \sum_{k=1}^i t_k + \sum_{k=1}^i t'_k > 0,$$

因此, 网络局部拥塞时, 通过开环反压机制进行控制能更快速地缓解拥塞, 避免拥塞进一步恶化.

开环反压机制针对局部拥塞能够快速调节, 当网络发生持久性拥塞时并不能很好地进行控制^[5]. 由1.2节分析可知, 压缩感知技术对拥塞有较好的控制作用, 因此, 当全局拥塞时可通过压缩感知来缓解网络全局拥塞. 根据不同的拥塞状况, 传感网络的工作状态可分为5种, 即 $S_i = \{(NC, LR), (NC, HR), (C, HR), (C, LR), (OOR)\}$ ^[6]. 其中: OOR 状态是网络的最优工作状态, C 代表拥塞, R 代表可靠性. 当网络因拥塞而偏离 OOR 状态时, 即认为网络产生了全局拥塞, 此时, 将网络切换到压缩感知状态, 可减小冗余信息, 缓解网络拥塞.

首先通过单位周期内 Sink 收到的具有拥塞标记的消息数量 $\text{recv}_{\text{mark}}$ 与总数据量 recv_{all} 判断当前的网络拥塞度 C , 即

$$C = \frac{\text{recv}_{\text{mark}}}{\text{recv}_{\text{all}}}. \quad (10)$$

然后利用 EWMA 方法对 C 进行平滑处理, 从而减少网络突发流等造成的波动, 有

$$C = \omega C + (1 - \omega)C_{T-1}. \quad (11)$$

其中: ω 为权重值, C_{T-1} 为上一时刻 C 的值.

最后, 通过 recv_{all} 和 C 来判断当前的网络状态, 具体分析详见仿真部分.

当网络拥塞缓解后将网络切换到正常采样的状态, 以避免因数据稀疏性较差带来的信号失真. 表1所示为不同稀疏度 (k) 的信号在 CS 机制下的恢复误差 (E) 比较. 其中, 信号维度 $N = 200$, $M = 50$, 重构算法选用压缩采样匹配追踪算法 (CoSaMP). 由表1可知: 稀疏性较好时通过 CS 机制恢复出来的信号精度较高; 随着稀疏性变差, 恢复精度随之降低. 因此, 当拥塞缓解后, 网络应切换到正常采样传输数据, 以确保数据可靠性.

表1 k - E 关系

k	8	14	18	23	32	48
E	0.0069	0.0153	0.0196	0.0449	0.0912	0.1278

CS-Rate 机制的伪代码流程如下:

```

CS-Rate control() {
  In Source node { /* 源节点 */
    Det-Con() { /* 拥塞检测 */
      If ( $Q_{\text{cur}} > Q_1$ ) Then G-con-flag ← 1; /* 全局性拥塞置位 */
      Else If ( $Q_{\text{cur}} > Q_2$ ) Then P-con-flag ← 1; /* 局部拥塞 */
    }
    If (CS) Then CS(); /* 若全局拥塞, 压缩感知
  }

```

处理数据 */

Else If (P-con-flag) Then { /* 若局部拥塞,

速率调节 */

If ($f_r \geq f$) Then $f_r = f_r/2$;

Else If ($\alpha f \leq f_r < f$) Then $f_r = f_r - \sigma f$;

Else If ($0 < f_r < f$) Then $f_r = f_r$; }

Else If ($f_r < f$) Then $f_r = f_r + \gamma f$; /* 速率恢复 */ }

In Sink node { /* 中心节点 */

Jud-Gla-Con() { /* 判断是否全局拥塞 */

All \leftarrow All+1; /* 周期时间收到数据包总数 */

If (G-con-flag) Then Con \leftarrow Con+1; /* 周期时间内收到拥塞标记数据包数目 */

$C \leftarrow$ Con/All;

$C \leftarrow (\omega C + (1 - \omega)C_{T-1})$; /* EWMA 平滑

处理 */

If ($C > \mu$) Then CS \leftarrow 1; /* 若发生拥塞, 标志位置位, 通知各节点 */ }

}

}

2 仿真实验

本文用 NS2 网络仿真软件进行仿真实验^[10-11], 分别对比分析网络发生拥塞后, 在速率控制机制 (Rate control)、GPCA 机制^[12]和 CS-Rate control 下的控制效果. 分别对比分析了三者吞吐量、网络延时和能耗性能方面的表现. 网络仿真配置参数表 2 所示.

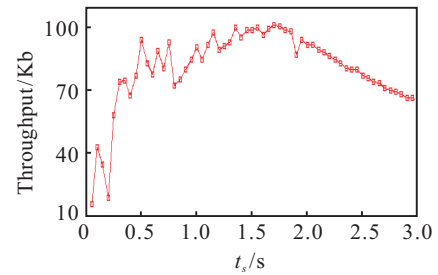
表 2 仿真参数配置

环境参数	配置值	环境参数	配置值
区域范围/m ²	1000	路由协议	DD
节点个数	200	MAC	802.11
通信距离/m	250	节点初始能量/J	1000
缓冲队列/Packet	100	分组大小/bt	128

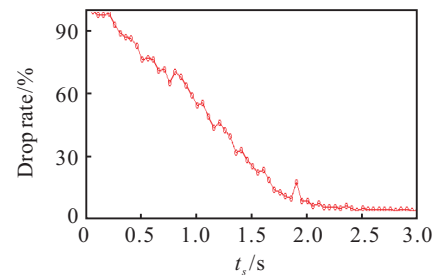
2.1 拥塞分析

通过统计不同发送间隔 t_s 下, 网络的吞吐量和丢包率来对网络的拥塞状况进行分析. 由图 2(a)可知, 网络在 t_s 较小时, 发送速率较大, 但吞吐量反而降低; 由图 2(b)可知, 在 t_s 较小时, 丢包率较大, 主要是由网络拥塞造成的, 从而使吞吐量反而降低. 随着 t_s 减小, 吞吐量会达到一个最大值, 此时为网络的 (C, HR) 状态. 参考文献 [6], 本文取 t_s 为 [2.0 ~ 2.5] 作为网络的 OOR 状态, 将此时的 $recv_{all}$ 和 $recv_{mark}$ 作为网络切换到压缩感知状态的拥塞指标. 当网络因拥塞而偏离

OOR 状态时, 将网络切换到压缩感知状态, 从而缓解网络拥塞.



(a) 吞吐量



(b) 丢包率

图 2 不同发送间隔下吞吐量与丢包率

2.2 吞吐量分析

图 3 为在 3 种机制下网络吞吐量的变化情况. 由图 3 可知: 网络在前 20s 没有产生拥塞, 网络吞吐量较低, 3 种机制下吞吐量基本相同; 在 20s 网络检测到事件发生, 节点发送速率增大; 发生局部拥塞后, 速率调节机制开始进行速率调节, 速率调节吞吐量增加不是很明显; 随着网络传输数据的累积, 网络在 100s 左右发生了全局性拥塞, 中心节点通知各节点通过压缩感知技术采集数据, 通过降低网络冗余数据, 较好地缓解了网络的拥塞状况, 吞吐量较 Rate 和 GPCA 机制有明显提升.

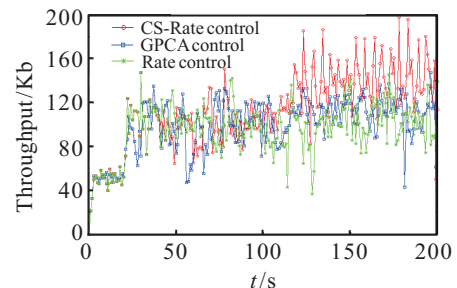


图 3 吞吐量变化图

2.3 网络延时分析

图 4 是网络时延的变化图, 可以看出: 网络在前 20s 没有产生拥塞, 网络时延较小; 此后, 网络开始发生局部拥塞, 速率调节机制开始进行速率控制, 通过速率调节对局部拥塞快速响应; 网络在 100s 左右发生全局拥塞, 节点通过压缩感知技术采集数据, 随

着数据在传输过程中不断地融合,数据传输量逐渐减小,网络拥塞得到了缓解.进行全局拥塞控制后,CS-Rate和GPCA较Rate机制下的时延更低;同时在CS-Rate机制下,网络时延较其他两种机制下更为稳定.

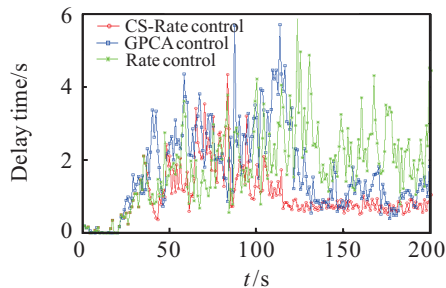


图4 网络延时变化图

2.4 能耗分析

图5是网络在3种机制下的能耗变化情况.结合吞吐量和时延变化情况可知:网络在前20s没有发生拥塞,能耗增速较平缓;网络运行到100s左右时网络出现全局拥塞,节点通过压缩感知技术采集数据,减小了冗余信息的传输,能耗增长较其他两种机制下更为平缓.

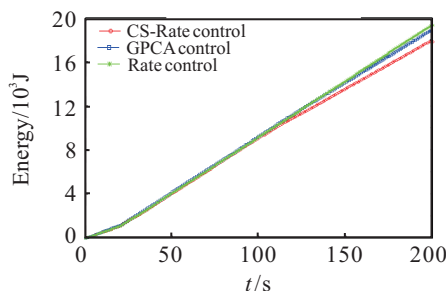


图5 能耗变化图

3 结论

本文将速率控制方法与压缩感知技术相结合缓解了网络的拥塞.当网络出现局部拥塞时,通过开环逐条反压机制调节发送速率.当网络出现全局拥塞时,通过将网络转换到用压缩感知的方法采集数据来降低网络负载,从而缓解了全局性的拥塞.从理论上分析了该机制控制拥塞时的特点.仿真结果表明,该机制在信息的吞吐量、网络延时和能耗方面都具有较好的性能.

参考文献(References)

[1] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey[J]. Computer Networks, 2008, 52(12): 2292-2330.

- [2] Wang C, Sohraby K, Li B. A survey of transport protocols for wireless sensor networks[J]. IEEE Networks, 2006, 20(3): 34-40.
- [3] Wang C G, Sohraby K, Hu Y M. Issues of transport control protocols for WSN[C]. Proc of Int Conf on Communication, Circuits and Systems. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2005: 422-426.
- [4] Cheng T E, Bajcsy. Congestion control and fairness for many-to-one routing in sensor networks[C]. Proc of the 2nd ACM Conf on Sensor Systems. Baltimore: ACM Press, 2004: 148-161.
- [5] Wan C Y, Eisenman S B, Campbell A T. Congestion detection and avoidance in sensor networks[C]. Proc of the 1st ACM Conf on Embedded Networks Sensor Systems. New York: ACM Press, 2003: 266-279.
- [6] Sankarasubramaniam Y, Akan B O, Akyidiz I F. Event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks[C]. Proc of the 4th ACM Int Symp on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: IEEE Press, 2003: 177-188.
- [7] 杨歆豪, 李泽. 无线传感网络中基于领导者的拥塞控制算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(9): 1348-1352. (Yang X H, Li Z. Congestion control algorithm based on leader for wireless sensor network[J]. Control and Decision, 2012, 27(9): 1348-1352.)
- [8] Donoho D L. Compressed sensing[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [9] Aldosari, Moura M F. Fusion in sensor networks with communication constraint[C]. Proc of the 3rd Int Symposium on Internation Proc in Sensor Networks. CA: IEEE Press, 2004: 108-115.
- [10] 柯志亨. NS2 learning guide[EB/OL]. (2011-11-27)[2013-12-15]. <http://hpds.ee.ncku.edu.tw/~smallko/ns2/ns2.htm>.
- [11] Intanagonwivat C, Govindan R, Estrin D, et al. Directed diffusion for wireless sensor networking[J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2003, 11(1): 2-16.
- [12] 李国华, 李建中, 高宏. ϵ -近似和加权公平性保证的无线传感器网络拥塞控制算法[J]. 计算机学报, 2011, 11(34): 2197-2210. (Li G H, Li J Z, Gao H. ϵ -Approximation and weighted fairness guaranteed congestion control algorithm for wireless sensor networks[J]. Chinese J of Computers, 2011, 11(34): 2197-2210.)

(责任编辑: 李君玲)