

无线传感器网络中基于拥塞程度分级的速率调节机制

江晶晶, 白光伟, 晏 鳌

(南京工业大学 计算机科学与技术系, 江苏 南京 210009)

摘 要: 文中提出一种基于拥塞程度分级的速率调节算法. 首先, 对缓冲区进行多尺度排队分析, 计算出缓冲区的溢出概率. 其次, 根据溢出概率的值, 把节点拥塞程度分成三级. 最后, 针对每一级拥塞采取相应的速率调节方案来缓解拥塞. 实验结果表明, 该算法可以有效缓解拥塞, 提高无线传感器网络的数据包投递率.

关键词: 无线传感器网络; 拥塞控制; 拥塞程度分级

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)05-0118-04

Rate Adjustment Algorithm Based on Congestion Levels for WSNs

JIANG Jing-jing, BAI Guang-wei, YAN Ao

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: This paper presents a rate adjustment mechanism based on congestion levels. We model the buffer using multi-scale queuing analysis to compute the probability of buffer overflow. On this basis, we define the three levels of congestion, and adopt the corresponding approach to rate adjustment to mitigate congestion for each level. The experiments show that this algorithm can improve the packet delivery ratio efficiently for WSNs.

Key words: wireless sensor networks; congestion control; congestion levels

1 引言

无线传感器网络由部署在监测区域内大量的廉价微型传感器节点所组成, 通过无线通信方式形成一个多跳的自组织的网络系统^[1]. 它具有节点大规模部署、自组织、拓扑结构动态变化、应用多种多样、以数据为中心诸多特点. 同时, 传感器节点也受到诸如电源能量、通信能力、计算和存储能力的限制.

传感器节点的大规模密集部署、多跳的多对一的通信方式、无线链路质量和突发事件导致的流量突发性, 这些都可能引起无线传感器网络的局部或全局拥塞. 拥塞会引起信息传输时延的增大和数据的丢失, 甚至引起 Sink 节点接收不到任何信息, 严重影响网络的传输服务质量. 引起传感器网络拥塞的重要因素是网络本身的“漏斗效应”和突发事件造成局部流量的增大^[2]. 在无线传感器网络的研究和

设计中, 及时检测和解除网络中出现的拥塞已成为保障网络服务质量的关键技术之一.

近年来, 研究人员针对无线传感器网络应用与通信方式的特殊性提出一些解决拥塞的控制机制. CODA^[3]适用于 Source 到 Sink 节点传输的拥塞控制, 基于接收者信道采样进行拥塞检测, 采用开环逐跳后压和闭环多源调节进行拥塞控制. ESRT^[4]强制调整源节点的发送速率以尽快提高可靠性. Fusion^[5]融合三种拥塞控制技术, Hop-by-hop 的流控制、源速率限制模式和有优先级的 MAC 层协议, 显著地改善网络的有效性、公平性和包丢失率. 拥塞检测很多时候都是基于队列长度的变化, 文献[6]提供一个多尺度排队分析的方法, 文献[7]采用 Gamma 小波模型分析缓冲区溢出概率, 这为拥塞检测提供了数学理论依据. 但是, 这些拥塞控制机制相对复杂, 具有一定的局限性. 简单准确的拥塞检测、及时

收稿日期: 2010-07-29; 修回日期: 2010-08-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(60673185); 教育部留学回国人员科研启动基金([2007]1108)

高效的拥塞通告和分布式自适应的拥塞解除都有待进一步的研究。

以上很多拥塞检测机制复杂,以致不能及时进行拥塞控制,因而这些机制大多在网络处于严重的局部拥塞或者持续的全局拥塞的状态时,才采取相应措施来缓解拥塞。文中提出一种基于拥塞程度分级的速率调节算法。首先,对缓冲区进行多尺度排队分析,计算出缓冲区的溢出概率。其次,根据溢出概率的值,把节点拥塞程度分成三级。最后,针对每一级拥塞采取相应的速率调节方案来缓解拥塞。实验结果表明,算法可以有效缓解拥塞,提高无线传感器网络的数据包投递率。

2 缓冲区的多尺度排队分析

假定有一个容量无限的缓冲区,数据发送速率为 C ,服务策略是先进先出(First In First Out, FIFO), $G(t)$ 是 $[0, t]$ 时间内流入缓冲区的通信流,令 Q_t 表示 t 时刻缓冲区的长度,且 $Q(0) = 0$,则有:

$$Q_t = \sup_{\tau \geq 0} (G(t) - C\tau) \quad (1)$$

利用多尺度分析的方法对通信流进行排队分析,可得 t 时刻的队列长度:

$$Q_s = \sup_{\tau \geq 0} (G^{(s)} - C\tau) \quad (2)$$

其中 s 是时间尺度, $G^{(s)}$ 是 s 下的累计通信流,即:

$$G^{(s)} = \sum_{j=0}^{s-1} G(t+j) \quad (3)$$

式中,时间尺度 s 是连续的。但是,在离散小波变换框架下,只能得到二阶的时间尺度,即 $s = 2^j$, ($j = 0, 1, \dots, n$)。因此,式(2)可以改写为:

$$Q_j = \sup_{j \in \{0, 1, \dots, n\}} (G^{(2^j)} - C2^j) \quad (4)$$

其中,累计通信量的计算公式为:

$$G^{(2^j)}(k) = \int_{k2^j}^{(k+1)2^j} G(t) dt \quad (5)$$

现实中,缓冲区的容量总是有限的,设溢出阈值为 K ,把缓冲区的溢出概率记为 P_{of} ,则:

$$P_{of} = P(Q_t > K) \quad (6)$$

在多尺度分析的情况下,设:

$$E_i = \{Q_{2^i} < K + C2^i\} \quad (7)$$

则有缓冲区的溢出概率为:

$$\begin{aligned} P(Q_j > K) &= 1 - P(Q_j < K) \\ &= 1 - P(\bigcap_{i=0}^j E_i) \end{aligned} \quad (8)$$

由文献[3]可知:

$$P(Q_j > K) \approx 1 - \prod_{i=0}^j P(E_i) \quad (9)$$

其中, $P(E_i)$ 的计算如下:

$$P(E_i) = \begin{cases} \text{Gam}(K_i), & i = 0 \\ \frac{\int_{-\infty}^{K_i} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \text{Gam}(K_i - x) dx}{\sqrt{2\pi}\sigma}, & i > 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中, $\text{Gam}(\cdot)$ 为 Gamma 分布的概率分布函数,参数为 α 和 λ ,即:

$$\text{Gam}(K_i) = \int_0^{K_i} \frac{\lambda^\alpha x^{\alpha-1} e^{-\lambda x}}{\Gamma(\alpha)} dx \quad (11)$$

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (12)$$

第 j 级的小波系数的参数分别为 μ_j 和 σ_j ,公式(10)中参数 μ 和 σ 的计算如下:

$$\mu = -\sum_{j=0}^{i-1} 2^{j/2} \mu_j, \quad \sigma = \sqrt{\sum_{j=0}^{i-1} 2^j \sigma_j^2} \quad (13)$$

在无线网络中,单纯的队列长度值并不能完全反映出当前真实的网络拥塞情况。而上述计算得到的缓冲区溢出概率可以较准确地反映出拥塞情况,为拥塞程度的分级提供了依据。

3 拥塞程度的分级

根据缓冲区溢出概率 P_{of} ,文中将拥塞划分为三个等级:第1级,表示网络不拥塞;第2级,表示网络趋于轻度拥塞;第3级,表示网络趋于严重拥塞。处于第2级和第3级的节点称为拥塞节点,具体见表1。

表1 拥塞程度等级的划分

拥塞程度	条件
1	$P_{of} \in [0, P_1)$
2	$P_{of} \in [P_1, P_2)$
3	$P_{of} \in [P_2, 1]$

网络拥塞程度的等级的准确判断,关键是选择好两个概率的门限值,即最小门限值 P_1 和最大门限值 P_2 。节点拥塞程度的等级划分为速率调节提供依据。

为避免或者缓解网络拥塞,调节拥塞节点和上游节点的发送速率是一个常用又有效的方式。文中的速率调节的策略如下:当拥塞等级为1时,线性增大发送速率,为了更有效地利用带宽资源;当拥塞等级为2时,拥塞节点线性减小发送速率,为了防止拥塞继续向下游节点传播;当拥塞等级为3时,拥塞节点不仅自己要线性降低速率,还要向上游节点反馈拥塞通告消息,其上游的邻居节点指数降低发送速

率,以防止其下游节点因队列溢出或信道的频繁冲突而造成网络的拥塞。

4 一种新的节点转发速率的调节

假设一个应用层的报文被划分为 n 个数据包进行传输,每个数据包的长度为 L_i ,占用带宽为 B_i , $P_g(i)$ 是无差错传输的概率,端到端的时延为 EED,误码率为 BER. 令应用层报文占用节点的队列长度为 Q ,则:

$$Q = \sum_{i=1}^n (EED \times B_i \times P_g(i) - L_i) \quad (14)$$

$$P_g(i) = (1 - BER)^{L_i} \quad (15)$$

为降低拥塞,对拥塞节点的发送速率自适应地进行调节,首先计算当前的发送速率 R .

$$R = \frac{B \times \log_2(1 + \text{SNR}/P_g)}{(Q + L) \times P_g} \quad (16)$$

其中, B 为带宽, SNR 是信噪比, P_g 是无差错地传输长度为 L 的数据包的概率, Q 是报文占用节点队列长度值, P_g 的计算公式为:

$$P_g = (1 - \text{BER})^L \quad (17)$$

根据第 3 节中的速率调节策略,定义两种情况下的调节速率 R_a .

(1) 若本节点未收到下游节点的拥塞通告,则速率调节公式为:

$$R_a = \begin{cases} R + (R_{\max} - R)/W, P_{of} \in [0, P_1] \\ R - (R - R_{\min})/W, P_{of} \in [P_1, 1] \end{cases} \quad (18)$$

其中, $R_{\max}$ 是最大的发送速率, $R_{\min}$ 是最小的发送速率, W 是决定速率变化幅度的调节因子. 第一个等式,表示在节点不拥塞时,线性增加发送速率,但不超过 $R_{\max}$. 第二个等式,表示在节点拥塞(轻度和严重)时,线性减小发送速率,但不小于 $R_{\min}$. $R_{\min}$ 是用于满足最低传输要求,在实验中,可以设为 0, $R_{\max}$ 可以设置为信道的最大容量.

(2) 若本节点收到拥塞通告,通告消息中包含速率调节的参数,则速率调节公式如下:

$$R_a = \max(e^{-1/P_{of}} \times R, R_{\min}) \quad (19)$$

严重拥塞节点的上游邻居节点以指数形式降低发送速率,但要满足最低传输的需求.

图 1 显示了速率调节的过程. 最终,通过合理的速率调节,达到缓解网络拥塞的目的.

5 性能分析

本节通过 NS2 仿真的方法获取实验数据,然后通过数学理论模型和 MATLAB 数学工具对速率调

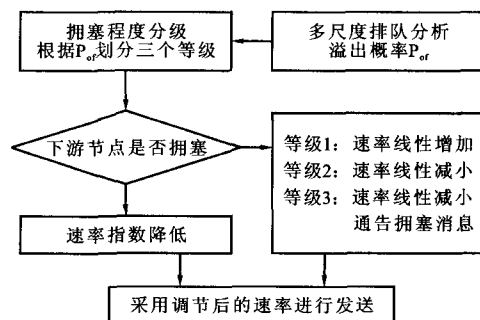


图1 速率调节流程图

节机制进行性能分析和评价. 在评价网络性能时,数据包的投递率(Packet Delivery Ratio)作为一个重要的性能指标,它反映了网络有效传输数据的能力.

实验分两组进行,分别讨论随着 Source 节点发送速率增大和通信流个数增加时,相应的数据包投递率的变化情况. 分别与未采用文中算法的情况下,比较数据包的投递率. 实验的公共参数设置如表 2 所示.

表2 实验参数设置

参数	值
传输范围	250m
拓扑大小	1000m×1000m
节点个数	100 个 Source 节点, 1 个 sink 节点
接口队列长度	100
接口队列类型	PriQueue
MAC 协议	IEEE802.11
通信流类型	CBR
CBR 包的长度	512Byte
仿真时间	100s

第一组实验: 1 个通信流,随着 Source 节点发送速率的增加,统计分析相应的数据包投递率的变化情况. Source 节点的发送速率从 40.96kbps 变化到 368.64kbps. 实验结果如图 2 所示.

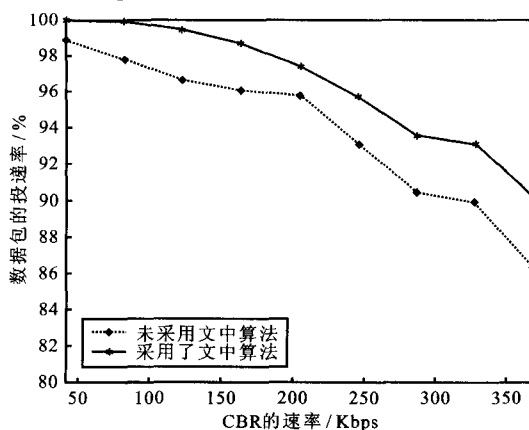


图2 投递率随发送速率的变化

随着速率的增加,数据包投递率呈现下降趋势.这是因为速率越大,数据包会越快地填满缓冲区,造成丢包.上述情况中,拥塞程度一般处于第3级,采用文中算法后,指数减少上游发送速率,有效缓解了本节点的拥塞.图2显示,采用文中算法后,数据包的投递率明显提高,大约1%到5%.

第二组实验:考虑多个通信流,各个通信流间隔1秒依次启动,通信流的类型为CBR,所有CBR流的速率固定为40.96kbps.随着CBR流个数的增加,统计分析最先启动的CBR流上数据包投递率的变化情况.CBR流的个数从1变化到9,实验结果如图3所示.

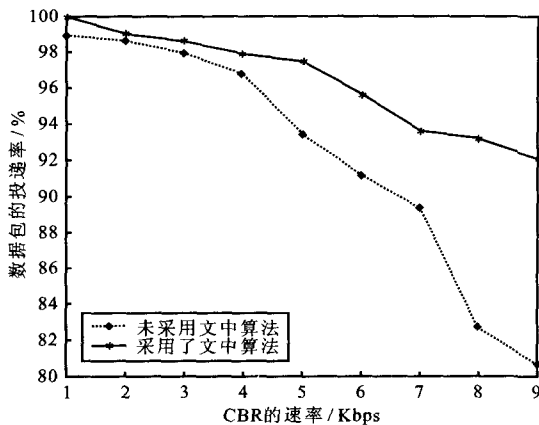


图3 投递率随通信流个数的变化

随着CBR流个数的增加,数据包投递率呈现下降趋势.这是因为通信流越多,造成的冲突概率越大.尤其是通信流个数较大时,数据包的投递率迅速下降.当采用文中算法,节点的拥塞处于第2级时,及时采取速率线性减小的策略,降低严重拥塞的概率,因而数据包的投递率提高较多,同时使得投递率的变化较缓和.

可以看出随着Source节点发送速率的增加或者通信流个数的增大,相应的数据包投递率都呈现下降趋势,当负载增加到一定程度时,若未采用速率调节策略,数据包的投递率会迅速降低.当采用文中算法,自适应地调节中间节点的发送速率,缓解了节点的拥塞,从而减少因为缓冲区队列溢出或者信道冲突而引起的丢包.

6 结束语

文中提出了一种基于拥塞程度分级的速率调节

算法.首先,对缓冲区进行多尺度排队分析,计算出缓冲区的溢出概率.其次,根据溢出概率的值,把节点拥塞程度分成三级.最后,针对每一级拥塞采取相应的速率调节方案来缓解拥塞.实验结果表明,算法可以有效缓解拥塞,提高无线传感器网络的数据包投递率.

参考文献:

- [1] 孙利民,李建中,陈渝,等. 无线传感器网络[M]. 北京:清华大学出版社,2005:4-25.
- [2] 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.
- [3] Wan C Y, Eisenman S B, Campbell A T. CODA: Congestion detection and avoidance in sensor networks [C]// Proc of the 1st ACM Conf on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press, 2003: 266-279.
- [4] Sankarasubramanian Y, Akan O B, Akyidiz I F. ES-RT: event-to-sink reliable transport in wireless sensor networks [C]// Proc of the 4th ACM Int'l Symp on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. New York: ACM Press, 2003:177-188.
- [5] Hull B, Jamieson K, Balakrishnan H. Mitigating congestion in wireless sensor networks [C]// Proc of the 2nd ACM Conf on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). New York: ACM Press, 2004: 134-147.
- [6] 龙图景,李春文. 一种基于瑞利分布的VBR视频流的小波模型[J]. 电子学报,2005,4(4): 638-642.
- [7] 王军元,白光伟,沈航. 基于小波分析模型的VBR视频流的时延和抖动分析[J]. 计算机科学,2008,35(10): 106-109.

作者简介:

江晶晶 男,(1986-),硕士生.研究方向为无线传感器网络的拥塞控制.

白光伟 男,(1961-),博士,教授,博导.研究方向为无线多媒体网络、无线传感器网络、QoS保障、网络体系结构和协议、网络系统性能分析、评价.

晏 鳌 男,(1986-),硕士生.研究方向为无线传感器网络、网络QoS保障.