

事件模型下的传感网优先级队列管理机制^{*}

杨琪¹, 董永强^{1,2+}

¹(东南大学 计算机科学与工程学院, 江苏 南京 211189)

²(计算机网络和信息集成教育部重点实验室(东南大学), 江苏 南京 211189)

Differentiated Priority Queue Management in Event-Driven Wireless Sensor Networks

YANG Qi¹, DONG Yong-Qiang^{1,2+}

¹(School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

²(Key Laboratory of Computer Network and Information Integration of Ministry of Education (Southeast University), Nanjing 211189, China)

+ Corresponding author: E-mail: dongyq@seu.edu.cn

Yang Q, Dong YQ. Differentiated priority queue management in event-driven wireless sensor networks. Journal of Software, 2012, 23(Suppl. (1)): 120-125 (in Chinese). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/12013.htm>

Abstract: In event-driven wireless sensor networks, many redundant packets flow from monitored sites through the network and to the sink, resulting in a typical funnel effect which affects event reliability, negatively. Taking this transport property into account, a differentiated priority queue management scheme is presented, in which the packets with same event identification are prioritized according to their arrival sequence, and scheduled differentially. The queue model, packet prioritization strategy and event table maintaining methods are examined in detail. Simulation results show that the queue management scheme can improve event reliability of event-driven sensor networks in terms of event detection ratio, accuracy ratio, and event delay efficiently.

Key words: wireless sensor network; event-driven transport model; funnel effect; priority queue; event reliability

摘要: 事件驱动的无线传感器网络中,数据传输呈现典型的漏斗效应,对事件可靠性带来负面影响.利用事件传输模型所固有的报文冗余特性,提出一种根据报文的到达次序,为同一事件的多份报文设定不同优先级并进行区分调度的传感网发送队列管理机制,详细介绍了其队列模型、报文优先级划分策略以及转发事件表维护算法.实验结果表明,该队列管理机制可有效提高事件检测率和准确率,并显著降低事件延迟.

关键词: 无线传感器网络;事件传输模型;漏斗效应;优先级队列;事件可靠性

传感器网络为无线信息采集领域提供了廉价快捷的解决方案,其应用遍布环境监测、灾区救援、军事国防、智能农业、生物医疗等各个领域.在一个典型的传感器网络中,各个传感器节点以无线多跳的方式形成一个网络,对检测区域内的事件进行检测或者查询.

基于特定的应用,传感器网络中的数据传输模型可分为事件传输模型、查询传输模型、持续传输模型、混合传输模型^[1].在事件传输模型下,检测到同一事件发生的所有传感器节点会同时将多份报文,以多对一的形式发送给汇聚节点,即使从内容上看这些数据是冗余的.针对该模型,文献[2]提出了一种称为事件可靠性(event

* 基金项目: 国家自然科学基金(61272532); 计算机网络和信息集成教育部重点实验室开放基金(K93-9-2010-26)

收稿时间: 2012-05-05; 定稿时间: 2012-08-17

reliability)的传输性能描述:应用仅需要成功地检测事件,而不是所有报文的成功传输。

事件传输模型为传感器网络带来了巨大的数据传输压力,当网络中某个源节点区域频繁产生事件报文,且路由层对于网络流量不敏感时(无分流或速率调节机制),事件传输模型下的拥塞现象有着明显不同于有线网络的特征,多篇文献^[3-5]将其称作“漏斗效应(funnel effect)”。文献[4]指出,漏斗效应发生的前提是多对一、逐跳传输,其表现是在靠近汇聚节点的区域,网络流量密度增加、报文冲突加剧,拥塞、丢包、能耗加大等现象越来越严重。

针对此问题,文献[6]提出一种称作 QRVQ 的主动队列管理机制,能够减少丢包率,但复杂的参数设置以及基于报文的可靠性保证机制导致关键事件的可靠性降低。文献[7]提出的 PriQueue 机制给予路由报文较高的优先级并以 FIFO(先进先出)的方式处理普通报文,同样缺乏基于事件可靠性的保证机制。本文则尝试结合事件传输模型的拥塞特性以及应用的可靠性保证需求,提出一种区分优先级的发送队列管理机制,希望网络即使在拥塞状态下,依然可以为应用提供较高的事件可靠性传输服务。

1 事件模型下的传输可靠性

现有的传感器网络可靠性传输协议分为两类:一类通过重传丢失的报文保证报文可靠性,要求节点能够暂时缓存已发送的报文,这类基于报文可靠性保证的传输协议,如 Siphon^[3]、ARC^[8]、CAR^[9]等,在事件传输模型下并不适用。另一类基于冗余发送的协议,通过信息冗余的方式提高可靠性,节点无需缓存已发送的报文,但会给网络带来额外的通信开销。事件传输模型具有先天的冗余特性,可充分利用这种特性提供面向事件的可靠性保证。

事件传输模型下应用对可靠性的要求不再是基于单个报文,而是基于事件。文献[2]对事件可靠性给出了一种定性的描述,本文在设计可靠性传输机制时对事件可靠性作如下定量的定义:

事件检测率:指被成功检测的事件数与发生的事件总数之比。当事件至少有一份报文到达汇聚节点时,即认为该事件被成功检测到。

事件准确率:指被准确检测的事件数与发生的事件总数之比。当事件至少有 R 份(应用对该事件的最低报文数要求)报文到达汇聚节点时,即认为该事件被准确检测到。

事件延迟:从某事件第一份报文发出,到汇聚节点接收到该事件第一份报文的时间延迟。

2 区分优先级的队列管理机制

2.1 队列模型

本文采用划分优先级的方式对经过中间节点的同一事件多份报文进行有区别的队列管理,采用该思路的主要原因是:

(1)事件的可靠性需求只要求网络可靠传输部分报文,冗余报文的可靠交付并不是必须的,即网络应优先保证少量报文可靠交付;

(2)传统队列 FIFO 的管理方式,会导致先发生的事件大量占用网络资源,后续事件在网络拥塞情况下,得不到网络资源,最终降低网络整体事件传输可靠性。

该机制的主要思路是:采用报文分级的策略,当拥塞发生时,只允许高优先级的报文通过,对于后续相同事件的报文采用自动降级的方式,对低优先级的报文在必要时进行丢弃或绕路传输(向漏斗外分流),达到漏斗内报文密度不变的目的。

假设某个事件产生的总报文数为 N ,应用对该事件的可靠性要求为 R (即至少需要 R 份报文到达),则到达某一中间节点的同一事件报文按如下策略划分为 3 级:

第 1 级:本节点接收到的该事件的第一份报文;

第 2 级:该事件接下来的 $R-1$ 份报文;

第 3 级:该事件剩下的 $N-R$ 份报文.

当一份报文到达时,优先级判定模块先判定该报文的优先级,之后以 FIFO 的方式进入相应优先级队列.在发送时,处理模块从所有非空队列中选取优先级最高的第 1 份报文进行发送(如图 1 所示),即:

第 1 级:无延迟地向父节点发送,以保证事件检测率和低的事件延迟;

第 2 级:第 1 级队列为空时向父节点发送,以保证事件准确率,即满足应用对事件报文数的最低要求;

第 3 级:当第 1、2 级队列为空时向父节点发送;拥塞时,采用丢弃或路由分流的方式处理.

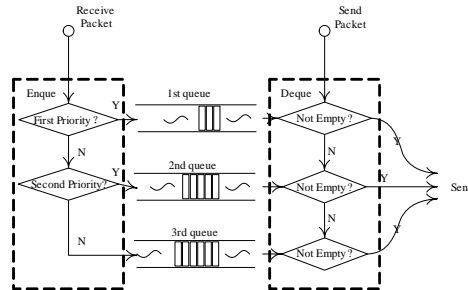


Fig.1 Differentiated priority queue model

图 1 区分优先级的发送队列模型图

2.2 队列实现细节及工作过程

优先级队列管理机制主要由事件报文优先级判定和转发事件表维护两个模块构成,其实现独立于特定链路层协议和网络路由协议.

2.2.1 转发事件 ID 表以及转发事件报文数表

队列管理机制需要维护转发事件 ID 表以及转发事件报文数表(统称转发事件表),其设计采用循环队列结构,工作方式如图 2 所示.

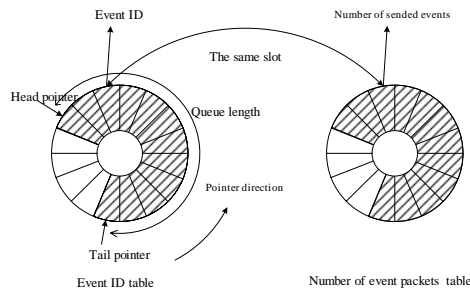


Fig.2 Cyclic structure of forwarding event table

图 2 转发事件表循环结构

2.2.2 优先级发送队列

优先级发送队列划分为 3 级,每一级队列包含相应报文,所有发送队列都是不定长的,且经常需要进行增删操作,增删操作只在队首以及队尾进行(FIFO),故采用二维链表实现优先级发送队列结构,如图 3 所示.

2.2.3 报文入队及出队流程

优先级发送队列的入队以及出队操作由链路层协议调用,入队操作需要查询转发事件表.处理模块从 low 到 high 遍历查询转发事件 ID 表,当发现表项内容为 A 时,表明该事件已经转发过,即当前处理的报文不是第 1 级报文.进而从转发事件 ID 表中找到 A 对应的槽位号,在转发事件报文数表相应槽位号中取出该事件已发送报文数 a 并加 1,若 a 大于应用要求的最低报文数,则该报文为第 3 级报文,反之为第 2 级报文.若在遍历转发事件 ID 表,未找到内容为 A 的表项,表明该报文为其对应事件的第 1 级报文,此时需将新事件 ID 添加到转发事件 ID

表中,并将转发事件报文数表相应位置 0.报文随后按设定的优先级完成入队操作.

出队操作只需要选择当前非空队列中优先级最高的第一份报文进行发送即可.

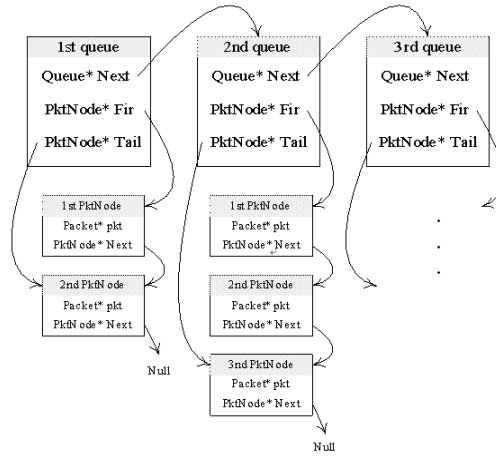


Fig.3 Data structure for differentiated priority queue

图 3 区分优先级发送队列结构

3 仿真及分析

本节采用 NS2^[10]仿真工具,对区分优先级队列管理机制进行仿真并分析.

仿真场景如图 4 所示.该场景中共有 6 个源节点(图中单圆标注的节点),汇聚节点在图中右下角(以双圆标注的节点).源节点数据发送速率范围从 5Kb/s~30Kb/s,符合典型传感器网络发送速率的仿真情况^[3,5,11],转化为 pkt/s(每秒发送报文数)的计量方式,相当于从 20pkt/s~120pkt/s.仿真中采用 AODV 路由协议.

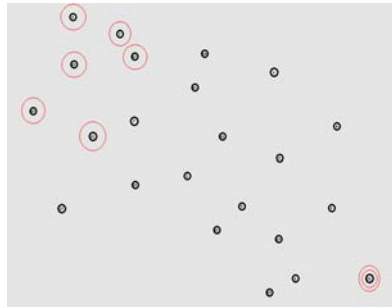


Fig.4 Simulation scenario

图 4 仿真场景

3.1 事件检测率

将本文提出的区分优先级队列管理机制(DPQ)与几种典型的队列管理机制(PriQueue,PI)进行对比,其中: PriQueue^[7]是一种改进的 FIFO 队列管理机制,在 FIFO 队列的基础之上,提高了路由报文的优先级.PI^[12]是一种控制拥塞的主动队列管理机制,使用瞬时队列长度计算报文丢弃概率,并采用积分方式消除“稳态误差”,将队列长度控制在某个参考值附近.

经过仿真,所得到的事件检测率结果如图 5 所示.可以看到,在源节点事件报文发送速率较低的情况下,各种队列管理机制均表现良好,但随着发送速率的提高,DPQ 队列管理机制逐步领先于 PriQueue 和 PI 机制,表明: DPQ 队列管理机制拥有更好的事件检测率传输性能.

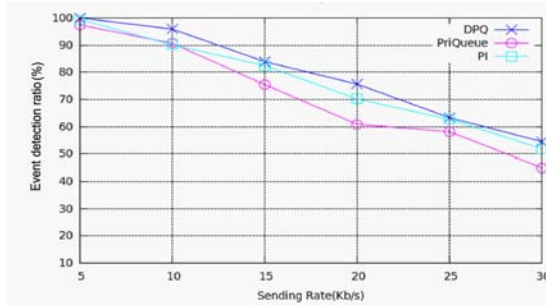


Fig.5 Event detection ratio
图 5 事件检测率仿真结果

3.2 事件准确率

当发送队列缓存大小为 10 个报文长度时,仿真得到的事件准确率结果如图 6 所示.此时的仿真结果并不理想,甚至随着发送速率的提高,DPQ 队列管理机制的事件准确率还低于另外两种队列机制.究其原因,源节点的报文产生速率在 20pkt/s~120pkt/s 之间,在事件突发的情况下,网络会经历剧烈的抖动,10 个报文长度的发送队列在抖动峰值处甚至容纳不下第 1 级报文,第 2 级报文的传输更是得不到保证,从而影响事件检测的准确率.当把发送队列缓存大小调整为 80 个报文长度时,所得事件准确率仿真结果如图 7 所示.可以看出,DPQ 队列管理机制在队列缓存大小可以满足第一级报文需求时,事件准确率有了明显提高.

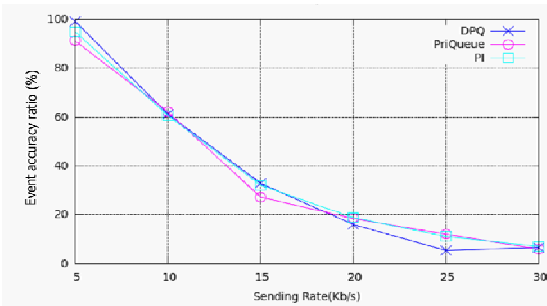


Fig.6 Event accuracy ratio (buffer size=10 pkts)
图 6 事件准确率仿真结果(10 个报文的缓存)

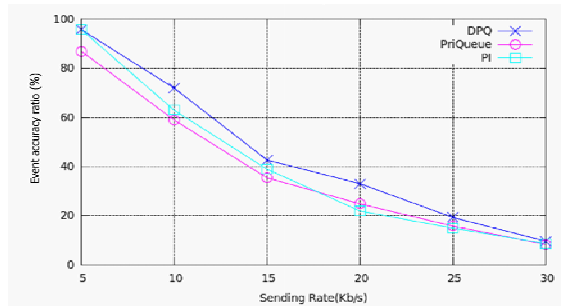


Fig.7 Event accuracy ratio (buffer size=80 pkts)
图 7 事件准确率仿真结果(80 个报文的缓存)

3.3 事件延迟

事件延迟只统计被成功检测的事件.经过仿真,得到的事件延迟结果如图 8 所示.结果表明:DPQ 队列管理机制对待高优先级报文的方式,使其事件延迟性能始终优于另两种队列管理机制.

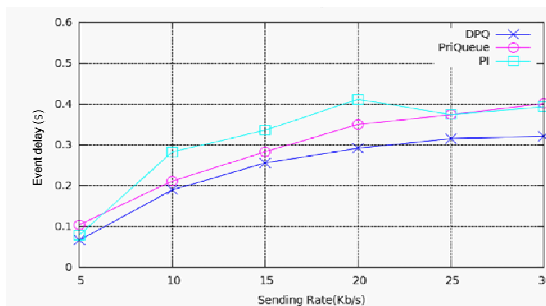


Fig.8 Event delay
图 8 事件延迟仿真结果

4 结束语

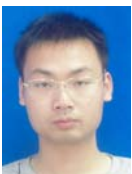
事件驱动的无线传感器网络中,数据传输呈现典型的漏斗效应,对事件可靠性带来负面影响.本文分析了传感网数据传输的拥塞特性,将事件可靠性分解为事件检测率、事件准确率、事件延迟等指标.利用事件传输模型所固有的报文冗余特性,提出了一种根据事件报文的到达次序区分优先级的发送队列管理机制.实验结果表明,通过对第 1、第 2 级报文的优先调度,该队列管理机制可有效提高事件检测率和准确率,并显著降低事件延迟.关于第 3 级报文的处理,可在网络拥塞时采取多径路由方式向漏斗外分流,以进一步提高事件准确率,此项工作留待后文介绍.

References:

- [1] Fang WW, Qian DP, Liu Y. Transmission control protocols for wireless sensor networks. *Journal of Software*, 2008,19(6): 1439–1451 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1439.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01439]
- [2] Akan ÖB, Akyildiz IF. Event-to-Sink reliable transport in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 2005, 13(5):1003–1016. [doi: 10.1109/TNET.2005.857076]
- [3] Wan CY, Eisenman S, Campbell A, Crowcroft J. Siphon: Overload traffic management using multi-radio virtual sinks. In: *Proc. of the ACM SenSys Conf.* 2005. 116–129.
- [4] Ahn GS, Miluzzo E, Campbell A, Hong S, Cuomo F. Funneling MAC: A localized, sink-oriented MAC for boosting fidelity in sensor networks. In: *Proc. of the 4th Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems.* 2006.
- [5] Wan CY, Eisenman SB, Campbell AT. CODA: Congestion detection and avoidance in sensor networks. In: *Proc. of the 1st Int'l Conf. on Embedded Networked Sensor Systems.* 2003.
- [6] Deng XD. Network queue management and congestion control in internet and wireless networks [Ph.D. Thesis]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, The Graduate School College of Engineering, 2004.
- [7] Boukhalfa L, Minet P, Midonnet S, George L. Comparative evaluation of CBQ and PriQueue in a MANET. In: *Proc. of the IEEE Int'l Workshop on Heterogeneous Multihop Wireless and Mobile Networks.* 2005.
- [8] Kang J, Nath B, Zhang Y, Yu S. Adaptive resource control scheme to alleviate congestion in sensor networks. In: *Proc. of the Broadnets.* 2004.
- [9] Kumar R, Rowaihi H, Cao GH, Anjum F, Yener A, La PT. Congestion aware routing in sensor networks. Technical Report, 2006.
- [10] Huang HJ, Feng SL, Qing LJ, Lu HZ. NS Network and Protocol Simulation. Beijing: Posts & Telecommunications Press, 2010 (in Chinese).
- [11] Chen BJ, Jamieson K, Balakrishnan H, Morris R. Span: An energy-efficient coordination algorithm for topology maintenance in ad hoc wireless networks. In: *Proc. of the 7th Annual Int'l Conf. on Mobile Computing and Networking.* 2001. 85–96.
- [12] Aweya J, Ouellette M, Montuno DY, Felske K. Rate-Based proportional-integral control scheme for active queue management. *Int'l Journal of Network Management*, 2006,16(3):203–231.

附中文参考文献:

- [1] 方维维,钱德沛,刘轶.无线传感器网络传输控制协议. *软件学报*,2008,19(6):1439–1451. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/19/1439.htm> [doi: 10.3724/SP.J.1001.2008.01439]
- [10] 黄化吉,冯穗力,秦丽姣,陆宏冶.NS 网络模拟和协议仿真.北京:人民邮电出版社,2010.



杨琪(1987—),男,江西南昌人,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络.



董永强(1973—),男,博士,副研究员,主要研究领域为网络资源分配,移动网络计算.