传感器网络拥塞避免与控制的模糊 AQM 算法

罗 成,谢维信
(深圳大学 ATR 国防科技重点实验室,广东深圳 518060)

摘 要: 传感器网络节点通信能力有限,当数据到达速率持续超过节点转发能力时网络会发生拥塞;传感器网络是任务型网络,对不同优先级的信息具有不同的服务质量要求.针对传感器网络信息传输的上述特性,提出了一种新的拥塞避免与控制算法 FAQM(Fuzzy Active Queue Management).该算法在综合考虑数据包的随机指数标记概率和优先级权值的基础上,建立了模糊逻辑推理系统,并以数据包丢弃因子作为参量来实现数据流的智能调控.NS2 仿真实验结果表明:FAQM 算法能减少高优先级数据包的丢弃率和节点间链路的时延,稳定节点队列长度,在有效避免与控制拥塞网络的同时提升网络整体 QoS(Quality of Service)性能.

关键词: 主动队列管理;指数标记;模糊逻辑推理;拥塞避免与控制
中图分类号: TN915.04 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)04-0679-06
电子学报 URL: http://www.ejournal.org.cn **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.04.009

Fuzzy AQM for Congestion Avoidance and Control in Sensor Networks

LUO Cheng, XIE Wei-xin
(*ATR Key Lab*, *Shenzhen University*, *Shenzhen*, *Guangdong* 518060, *China*)

Abstract: There is limited communication ability in sensor networks. When the data arrival rate is persistently beyond its transmission ability, the network congestion occurs. Sensor networks are task-based, where data packets with different prior privileges require different Quality of Service (QoS). To address this challenge, an algorithm for congestion avoidance and control in sensor networks, called fuzzy active queue management(FAQM), is proposed. In the algorithm, the random exponential marking probability of a packet along with its priority weight is considered to establish a fuzzy logic inference system, and the intelligent regulation of the data stream is realized by taking the packet dropping factor as the parameter. The experimental results in network simulator version 2 show that FAQM can reduce high priority packets' dropping rate and link delay and stabilize the queue length of the node, therefore it can avoid and control the network congestion and improve the network QoS performance at the same time.

Key words: active queue management; random exponential marking; fuzzy logic inference; congestion avoidance and control

1 引言

传感器网络节点的通信能力有限[1],其固有的多到一、多跳通信模式使得传感器网络常会出现拥塞[2].传感器网络一旦检测到事件,将发生数据流量激增、多点向一点汇聚等现象,且越靠近事件发生区域的节点通信量越大,该热点区域的汇聚节点更是如此.当数据的到达速率持续超过节点的处理能力时,将产生分组丢弃、网络吞吐率下降、网络延迟增加等现象,这种情况称为网络拥塞.严重时甚至会出现网络瘫痪,造成用户不能快速准确评估监测区域内发生的事件.

对于网络拥塞控制,主动队列管理[3](Active Queue Management,AQM)是常用的一种方法.它在发生拥塞的节点中使用更加准确的拥塞信息来检测和控制数据流,以标记或者丢弃数据包的方式达到拥塞避免的目的,从而避免"死锁"行为的发生.AQM 拥塞避免与控制策略已经成为一个活跃的研究领域,如随机早期检测[4](Random Early Detection,RED),随机指数标记[5](Random Exponential Marking,REM)等.将它们应用到传统网络的拥塞控制问题中,能使网络服务质量得到改善.针对网络 AQM 改进算法目前也有一些研究成果,如文献[6]针对 RED 方法在动态环境中的不稳定性、参数难以调整等问题,提出了一种 LRED(Loss Ratio-based RED)算法,使网络的吞吐量等性能得到提升.文献[7]针对 REM 算法中的"价格"提出一种自适应的动态更新函数,在节点的队列长度控制上取得了令人满意的效果.

收稿日期:2013-04-07;修回日期:2013-10-16;责任编辑:孙瑶
基金项目:国家自然科学基金(No.61271107);国家科技支撑计划重大项目(No.2011BAH24B12)

以上这些 AQM 策略和算法都是为克服传统网络数据流管理的缺陷而提出的,其共同特点是统一运用了概率丢弃机制.使节点队列中的数据包都公平对待.而传感器网络是任务型网络,具有以数据为中心和与应用相关等特点,其应用概率丢弃机制时的正确性不仅依赖于拥塞信息的充分性,而且跟具体的应用场景相关,不同类型的数据包对网络的服务质量参数(如数据延迟或丢包率等)有着不同的需求[8].以传感器网络火灾预警应用为例,部署在监视区域内的传感器不断采集温度、气体密度等信息并实时传送给信息融合中心进行火灾监控,源节点一旦发现某个地区的温度和气体密度达到火灾发生的警戒条件,就需要向用户及时报告这些关键数据.报告该事件的数据包比在相同链路上传输的其他数据包需要更高的服务质量,网络不仅要赋予所有的数据包不同的优先等级,还需针对不同优先级的数据包进行区分服务.因此,有必要对传统的 AQM 算法进行改进,以使其能应用于服务质量具有差异性的传感器网络.

为此,本文提出了一种基于优先级调度机制的适合传感器网络拥塞避免与控制的模糊 AQM 算法(Fuzzy Active Queue Management,FAQM),在综合考虑 REM 算法的数据包随机指数标记概率和优先级权值的前提下,以模糊逻辑推理的方式来实现网络数据流的智能调控.

2 模糊 AQM 拥塞避免与控制模型

AQM 算法以精确的数学模型为基础,如果直接在该模型下引入区分服务,可能会影响 AQM 算法的整体控制性能,甚至有可能无法得到收敛的结果.而模糊逻辑控制无需被控对象的精确数学模型,并具有自适应性强,动态性能好,计算复杂度低等优点,因此本文尝试把模糊逻辑理论引入到 AQM 系统中来,通过综合考虑数据包的 REM 算法标记概率和优先级权值,在传感器网络的转发节点上实现数据包区分服务.

网络节点正常工作时,存在一个理想队列长度 λ[9],当检测到重要、紧急事件发生时,节点输入流量将急剧增长,会迅速超过节点的处理能力,其直接后果就是导致缓冲队列长度 $q(t)$的增加.为避免网络进入拥塞,比较 $q(t)$与 λ 的值:如 $q(t)>\lambda$,认为网络将会发生拥塞,立即采取拥塞控制 FAQM 算法;否则,将数据包直接放入发送队列.本文提出的网络拥塞避免与控制模型的原理框图如图 1 所示.具体的实现步骤如下:

(1)计算出该数据包的 REM 算法标记概率(packet REM marking,prm)、数据包优先级(packet priority level,ppl),并将其模糊化得到对应的语言量 $\tilde{M}_i$ 和 $\tilde{L}_j$,其中 $i,j=1,2,3,4,5$;

(2)根据 $\tilde{M}_i,\tilde{L}_j$,利用设定的推理规则进行推理,得到数据包丢弃参考因子的语言值 $\tilde{P}_m(m=1,2,3,4,5)$,并计算出 $\tilde{P}_m$ 的隶属度 $\mu_{\tilde{P}_m}(t)$;

(3)对 $\tilde{P}_m$ 运用质心去模糊,得到数据包丢弃参考因子 p;

$$p=\frac{\int_0^1 t\mu_{\tilde{P}_m}(t)\mathrm{d}t}{\int_0^1 \mu_{\tilde{P}_m}(t)\mathrm{d}t} \tag{1}$$

(4)针对具体的应用需求预设数据包丢弃门限 Th($Th>0$).根据该数据包的丢弃参考因子 p 决策是否将其丢弃.如果 $p\leqslant Th$,则将其继续放入发送队列;如果 $p>Th$,则说明此时传输链路状况不好或者此数据包优先级较低,可通过丢弃该数据包,为紧急、重要的数据包预留带宽资源,保证高优先级数据高效地传递到 SINK 节点.

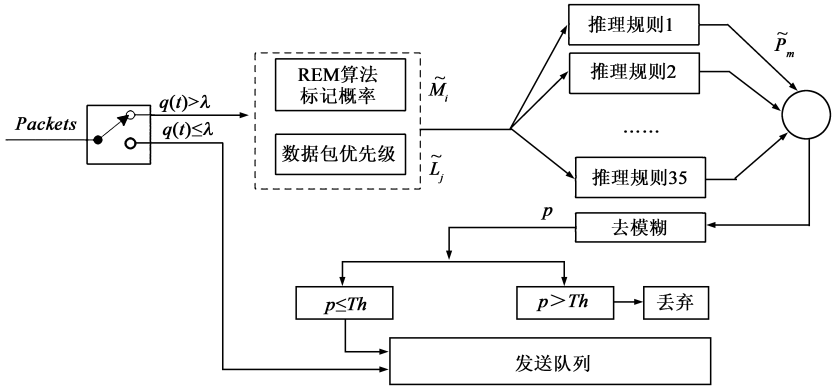


图1 模糊拥塞避免与控制模型

3　模糊 AQM 算法

3.1　网络拥塞程度度量及其模糊化

随机指数标记(REM)算法是一种典型的 AQM 算法,利用 Kelly 提出的网络流量优化理论中的“价格”的概念来探测和控制网络的状态.初始时刻“价格”的大小 $pr_l(0)=0$,设 $b_l(kT)$和 b_l^* 分别是 kT 时刻节点队列的长度和期望队列长度,$x_l(kT)$是数据包到达速率,$c_l(kT)$是数据包转发速率.$b_l(kT)-b_l^*$ 度量队列长度在当前时间窗的匹配情况,$x_l(kT)-c_l(kT)$可以度量速率的匹配情况.REM 算法中“价格”的变化便由这两方面的因素决定,两者的加权和作为价格.价格的迭代公式为:

$$pr_l[(k+1)T]=[pr_l(kT)+\gamma(\alpha(b_l(kT)-b_l^*)+\beta(x_l(kT)-c_l(kT))]^+ \tag{2}$$

其中,$[X]^+=\max\{X,0\}$,$\alpha>0$、$\gamma>0$ 和 $\beta>0$ 都是加权参数.

如一个数据包在 kT 时刻的价格为 $pr_l(kT)$,则在网络节点间链路 l 处的 REM 标记概率[5]为:

$$m_l(kT)=1-\Phi^{-pr_l(kT)} \tag{3}$$

其中 $\Phi=1.001$.由式(3)知,数据包的 REM 标记概率论域为[0,1).对应此输入论域,将数据包的标记概率 prm 划分为“VL(很低)”、“L(低)”、“N(一般)”、“H(高)”和“VH(很高)”5 个语言值 $\tilde{M}_i$.REM 标记指数分布相对均匀,定义的模糊集相对稀疏,它们的隶属度函数如式(4)、式(5)和式(6)所示:

$$\mu_{\tilde{M}_1}(x)=\begin{cases}1, & x<0.1\\ 1.5-5x, & 0.1<x<0.3\\ 0, & \text{else}\end{cases} \tag{4}$$

$$\mu_{\tilde{M}_5}(x)=\begin{cases}1, & x>0.9\\ 5x-3.5, & 0.9>x>0.7\\ 0, & \text{else}\end{cases} \tag{5}$$

$$\mu_{\tilde{M}_i}(x)=\begin{cases}1-\dfrac{|x-c_i|}{b}, & \in[c_i-b,c_i+b]\\ 0, & \text{else}\end{cases} \tag{6}$$

其中 $b=0.15$,$c_i(i\in\{2,3,4\})$ 如表 1 所示.

表 1　$\tilde{M}_i$ 的隶属度函数 c_i 取值

c_2	c_3	c_4
0.35	0.5	0.65

3.2　数据包优先级及其模糊化

传感器网络最重要的功能是要在尽可能短的时间内可靠地告知用户重要事件的发生和该事件的相关参数.实时性是传感器网络的生命,如紧急的、重要事件参数的数据包时延过大,再重要的消息也会变得毫无价值.且事件的发展是一个持续的过程,网络传输时数据包所保持信息的精确性会随时间而降低.网络拥塞引起数据传输拥堵、节点崩溃等现象造成上报紧急事件的数据包丢失、排队延时和传输抖动都会影响用户对该紧急事件的判断和决策.

考虑到在传感器网络应用中重要事件发生时,链路上传输的数据包代表的事件重要性并不完全相同,此时应结合网络资源状态,适当降低其他不重要事件的信息数据传输及时性或者可靠性,为重要的、紧急的事件预留资源,保障其服务质量.例如,在对空预警系统中,当广域部署的传感器网络监测到空中目标时,源节点持续地向 SINK 报告目标的特征、当前位置、移动速度等.战场上战机转瞬即逝,如源节点发现的某一重大威胁的目标信息因为网络拥塞而无法及时传输到指挥中心,将对整个战局或者战场带来严重影响.此时适当降低威胁度不大的目标信息传输的优先级以减少网络中总的数据传输量以避免与控制拥塞,可为高威胁度目标信息的高效快速传输提供保障.

利用这一属性,IETF(Internet Engineering Task Force)提出了在互联网中应用区分服务的想法.即在 IP 数据报结构中加入服务类型[10](Type Of Service,TOS)字节,其前六位设置为区分服务中的区分服务代码点(DiffServ Code Point,DSCP),用于指示数据包在网络转发路径的中间节点上被处理的方式.其区分服务的标记域如表 2 所示.

表 2　IP 包头的区分服务标记域

位数	0	1	2	3	4	5	6	7
内容	DiffServ Code Point						Unused	

传感网络具有丰富的应用范围与应用场景,在某些应用中,事件优先级别的多层次需求成为优先级设定时必须考虑的因素.本文在传输协议中沿用了该域的设立位置,但根据传感器网络相关应用的特性将其内容另行定义为传感器网络事件优先级(priority)字段.网络源节点可以根据数据包描述的事件重要性等级赋予该字段一个 0 到 63 的权值,权值越大说明数据包越重要.在网络传输途中该优先级字段保持不变.

由于数据包优先级 ppl 的论域为[0,63]且为整数,首先将其归一化.在应用之中,通常分组优先级会密集分布于 0.2~0.8 之间,为此,在该区间密集定义模糊集,将其划分为“VW(很弱)”、“LW(较弱)”、“W(弱)”、“MI(中等)”、“P(弱)”、“LP(较强)”和“VP(很强)”七个语言值 $\tilde{L}_j$.它们的隶属度函数如式(7)、式(7)和式(9)所示.

$$\mu_{\tilde{L}_1}(x)=\begin{cases}1-5x, & 0\leqslant x<0.2\\ 0, & \text{else}\end{cases} \tag{7}$$

$$\mu_{\tilde{L}_7}(x)=\begin{cases}5x-4, & x>0.8\\ 0, & \text{else}\end{cases} \tag{8}$$

$$\mu_{\tilde{L}_j}(x)=\begin{cases}1-\dfrac{|x-d_j|}{e}, & \in[d_j-e,d_j-e]\\ 0, & \text{else}\end{cases} \tag{9}$$

其中 $b=0.15$, $d_j(j\in\{2,3,4,5,6\})$如表 3 所示.

表 3 $\tilde{L}_j$ 的隶属度函数 d_j 取值

d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
0.25	0.4	0.5	0.6	0.75

3.3 数据包丢弃参考因子模糊化

对于输出量数据包丢弃参考因子,取其论域为[0,1],其取值越大,说明数据包丢弃可能性越大.将其划分为 5 个模糊集,分别为"VS(很小)"、"S(小)"、"M(中等)"、"B(大)"和"VB(很大)"$\tilde{P}_k(k=1,2,3,4,5)$,它们的隶属度函数如式(10)~(12)所示.

$$\mu_{\tilde{P}_1}(x)=\begin{cases}1-10/3, & x<0.3\\ 0, & \text{else}\end{cases} \tag{10}$$

$$\mu_{\tilde{P}_5}(x)=\begin{cases}(10x-7)/3, & x>0.7\\ 0, & \text{else}\end{cases} \tag{11}$$

$$\mu_{\tilde{P}_k}(x)=\begin{cases}1-\dfrac{|x-f_k|}{g}, & x\in[f_k-g,f_k+g]\\ 0, & \text{else}\end{cases} \tag{12}$$

其中 $g=0.2$, $f_k(k\in\{2,3,4\})$如表 4 所示.

表 4 $\tilde{P}_k$ 的隶属度函数 f_k 取值

f_2	f_3	f_4
0.3	0.5	0.7

3.4 模糊 AQM 的推理规则

根据输入量的隶属度划分,共有规则三十五条,其数学表达式为:

$$(\tilde{M}_i\times\tilde{L}_j\rightarrow\tilde{P}_k)\quad i,j,k=1,\cdots,5 \tag{13}$$

其中,$\tilde{M}_i$, $\tilde{L}_j$, $\tilde{P}_k$ 分别对应输入量数据包 REM 标记概率 rpm 的语言值,数据包优先级 ppl 的语言值,输出量为数据包丢弃参考因子 p 的语言值.

推理系统的推理规则形式为[11]:

$$\text{If rpm}=\tilde{M}_i\text{ and ppl}=\tilde{L}_j\text{ then }p'=\tilde{P}_k \tag{14}$$

表 5 列举了 FAQM 的逻辑推理规则表.运用模糊逻辑推理规则推理得到数据包丢弃参考因子 P_k,其隶属度通过式(15)得到.

$$\mu_{\tilde{P}}(p)=\bigvee_{n=1}^{35}[(\mu_{\tilde{M}_i}(\text{rpm})\wedge\mu_{\tilde{L}_j}(\text{ppl})\wedge\mu_{\tilde{P}_k}(p)],p\in[0,1] \tag{15}$$

表 5 模糊 AQM 逻辑推理规则表

$\tilde{P}$ \ $\tilde{L}$ / $\tilde{M}$	VP	LP	P	MI	W	LW	VW
VL	VS	VS	VS	S	M	M	B
L	VS	S	M	M	M	M	B
N	S	M	M	M	M	B	VB
H	S	M	B	M	B	VB	VB
VH	M	M	M	B	VB	VB	VB

4 仿真试验

本文采用 NS2 平台对提出的拥塞控制算法 FAQM 与 LRED[6]、AREM[7]等算法在以下方面的网络性能上进行对比:

(a)高优先级数据包丢弃率,指在单位时间内被网络转发节点意外丢弃的高优先级数据包占源节点产生的高优先级包总量的百分比.

(b)高优先级平均链路时延,指网络内高优先级数据包在网络内所有节点链路传输的平均时延[12].源节点到 SINK 节点的时延为该平均时延与源节点到 SINK 节点间的跳数之积.

(c)节点队列长度变化情况,即传感器网络的节点的缓冲队列长度的变化情况,节点队列长度变化越剧烈,说明网络的吞吐量越不稳定.

在对比实验中,传感器网络节点的各层协议修改要求参照文献[13],其他模拟参数设置如下:

60 个传感器节点随机均匀地分布在 $100\times100\text{m}^2$的正方形区域内,随机选择 10 个节点作为源节点,SINK 也在除已选择的源节点外随机选取.记载各类节点实际位置后,三种算法都用此相同拓扑结构进行仿真.每个数据包大小为 48byte,期望队列长度大小为 80 个 packet,源速率采用 5 packet/s 到 20 packet/s 的 VBR 模型,数据包优先级以高斯分布随机产生.预设数据包丢弃门限 $Th=0.75$,仿真时间为 20s.

(1)高优先级数据包丢弃率

实验设置成每隔 1 秒 SINK 节点计算一次网络高优先级数据包(优先级权值大于 48 的)的丢弃率,实验结果如图 2 所示.由图 2 可看出,网络运行刚开始时,LRED 的丢弃率最高,这主要是因为它的丢弃门限较低,但 AREM 通过自适应的配置网络参数趋近最优运行区域(Optimal Operating Region,OOR),控制网络趋于理想状态,故其丢包率抖动较小.由于传感器网络的数据的突发本质,LRED 与 AREM 的数据包丢弃率网络运行初期都较高,而且网络没有区分服务,高优先级数据包被丢弃的概率与普通数据包相同,导致高优先级包被丢弃率达到了 8% 以上,并且丢弃率随着网络状态变化

抖动剧烈.FAQM 由于采用模糊控制,能够处理突发数据流,并且从一开始,一直将高优先级数据包丢弃率控制在 2% 左右,说明 FAQM 算法对高优先级数据包具有较强的保护能力.

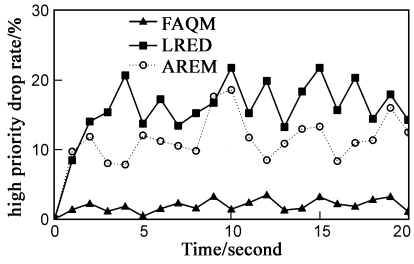


图2　高优先级数据包丢弃率

(2)高优先级数据包时延

数据包传输实时性决定了网络在多快程度上满足用户 QoS 需求.图 3 描述了上述环境下,三种算法的高优先级链路平均时延.可以看出 LRED 的链路平均时延较 AREM 与 FAQM 大,而且时延抖动也比它们激烈.因为 LRED 采用的节点队列拥塞采样检测方法并不能实时跟踪节点状态,对拥塞的判断存在一定的时滞,所以高优先级数据包会因为阻塞而时延扩大.FAQM 方式下的高优先级数据包的平均传输时延总是小于 LRED 和 AREM,因为 FAQM 算法的数据包丢弃机制减少了部分相对不必要的数据传输量.这表明 FAQM 将节点一直控制在正常工作状态下,网络没有出现数据流突变引发网络拥塞从而导致数据排队延时过大等现象.同时 FAQM 的数据包多重优先级的设置,保证碰撞仅发生在具有同样优先级的数据包之间,可以有效降低重传时延.因此,FAQM 算法根据网络负载与数据传输优先权值调控分发数据包的方法,提高了系统中重要信息的吞吐量,降低了高优先级数据包的链路时延.

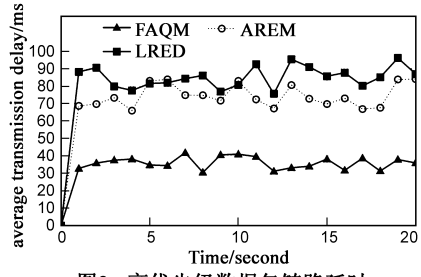


图3　高优先级数据包链路延时

(3) 节点队列长度变化情况

图 4 至图 6 列举了仿真时三种算法下某个汇聚节点(SINK 的一跳上游节点)队列长度的变化情况,表 6 与表 7 分别列出了三种算法下所有汇聚节点的平均队列长度与方差大小.

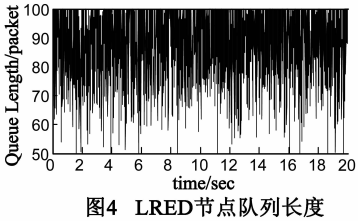


图4　LRED节点队列长度

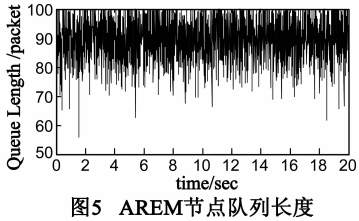


图5　AREM节点队列长度

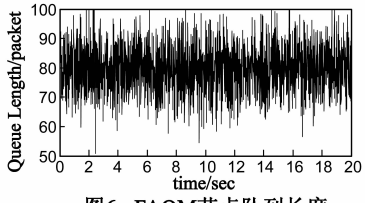


图6　FAQM节点队列长度

表 6　三种算法下汇聚节点平均队列长度(单位 pkt/s)

	节点 1	节点 2	节点 3
LRED	102.0632	106.8362	97.1443
AREM	92.3252	95.6325	94.5281
FAQM	81.3241	83.5634	82.8372

表 7　三种算法下汇聚节点队列长度方差

	节点 1	节点 2	节点 3
LRED	162.3492	129.6721	135.5214
AREM	98.7821	112.4382	95.7488
FAQM	102.4721	96.5228	92.2124

从上述图表可以看出,LRED 系统队列长度大幅震荡,同时短队列的出现概率也加大.由于队列震荡会加剧时延抖动,网络处于链路利用率很低的状态,降低了网络整体吞吐量,从而可能达不到网络应用准确性的要求.而 LREM 算法下的节点队列始终在期望的队列长度小幅摆动.FAQM 与 AREM 性能相当,但是由于同时考虑到区分服务的原因,队列的保持性能在满足拥塞控制需求的情况下逊于 LREM.但是 FAQM 还是都能通过保持期望的平均队列长度(Average Queue Size),降低网络数据包丢弃率的同时保证了网络的吞吐量和传输稳定性.

5　小结

在传感器网络中,SINK 节点及时接收到高优先级的数据包是信息用户高质量决策和高效率行动的基础.本文提出了一种新的传感器网络拥塞避免与控制算法——FAQM,通过引入区分服务的理念,利用模糊推理实现传感器网络的主动队列管理.NS2 仿真实验结果表明:FAQM 能够减小高优先级数据包的丢包率,降低用户获取高优先级信息的时间,稳定节点队列长度,

进而提高吞吐量.传感器网络运用 FAQM 算法可有效避免与控制网络拥塞和提升网络的整体 QoS 性能.

参考文献

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

[2] 张玉鹏,刘凯,王广学.基于无线传感器网络的跨层拥塞控制协议[J].电子学报,2011,39(10):2258 – 2262.
ZHANG Yu-peng, LIU Kai, WANG Guang-xue. Cross-layer congestion control for wireless sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(10): 2258 – 2262. (in Chinese)

[3] Firoiu V, Borden M. A study of active queue management for congestion control [A]. Proceedings of the Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies [C]. USA: IEEE, 2000. 1435 – 1444.

[4] Floyd S, Jacobson V. Random early detection gateways for congestion avoidance [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 1(4): 397 – 413.

[5] Athuraliya S, Low S H, Li V H, et al. REM: Active queue management [J]. IEEE Network, 2001, 15(3): 48 – 53.

[6] Chonggang W, Jiangchuan L, Bo L, et al. LRED: Arobust and responsive AQM algorithm using packet loss ratio measurement [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2007, 18(1): 29 – 43.

[7] Tan L, Peng G, Chan S. Adaptive REM: Random exponential marking with improved robustness [J]. Electronics Letters, 2007, 43(2): 133 – 135.

[8] 卓力,张菁,等.一种面向无线视频传感器网络的多径 QoS 保障路由协议[J].电子学报,2013,41(6):1122 – 1129.
ZHUO Li, ZHANG Jing, et al. A QoS-guaranteed multi-path routing protocol for WVSNs [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(6): 1122 – 1129. (in Chinese)

[9] Yu F, Liu W, Bai L. Animproved active queue management algorithm based on queue length and traffic rate factor [A]. Practical Applications of Intelligent Systems (Vol. 124) [C]. Berlin Heidelberg: Springer, 2012. 669 – 679.

[10] Baker F, Black D, Blake S, et al. Definition of the Differentiated Services Field (DS field) in the IPv4 and IPv6 Headers [M]. USA: RFC, 1998.

[11] 谢维信.工程模糊数学方法[M].陕西西安:西安电子科技大学出版社,1991.22 – 25.
Weixin XIE. Engineering Fuzzy Mathematics [M]. Xi'an, Shaanxi: Xi'an University of Electronic Science and Technology University Press, 1991, 22 – 25. (in Chinese)

[12] 郜帅,张宏科.时延受限传感器网络移动 Sink 路径选择方法研究[J].电子学报,2011,39(4):742 – 747.
GAO Shuai, ZHANG Hong-ke. Optimalpath selection for mobile sink in delay-guaranteed sensor networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(4): 742 – 747. (in Chinese)

[13] Shijun Z, Panpan W, Junhai H. Simulation analysis of congestion control in WSN based on AQM [A]. Proceedings of the International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC) [C]. USA: IEEE, 2011. 197 – 200.

作者简介



罗 成 男,1984 年 9 月生于湖南省衡阳市,深圳大学博士研究生,主要研究方向为传感器网络的通信与组网、网络的拥塞与控制、网络的 QoS 等.
E-mail: luocheng1@email.szu.edu.cn



谢维信 男,1941 年生于广东省,教授、博导,深圳大学信号与信息处理学科学术带头人,国家级有突出贡献中青年专家.1965 年毕业于西安军事电信工程学院,1981 年 ~ 1983 年在美国宾夕法尼亚大学作访问学者,1989 年 ~ 1990 年在美国宾夕法尼亚大学作访问教授.发表论文 120 余篇,出版专著多部,主要研究方向为传感器网络、智能信息处理、模糊信息处理等.